



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Neue Folge | Band 118 | Nummer 400

Rolle der Wissenschaft im Globalen Wandel

Herausgegeben von
Detlev Drenckhahn und Jörg Hacker



Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2013

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Herausgegeben von Jörg HACKER, Präsident der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 400

BAND 118

Rolle der Wissenschaft im Globalen Wandel

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
vom 22. bis 24. September 2012 in Berlin

Herausgegeben von:

Detlev DRENCKHAHN (Würzburg)
Senator der Leopoldina

Jörg HACKER (Halle/Saale, Berlin)
Präsident der Leopoldina

Mit 123 Abbildungen und 27 Tabellen



**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2013
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart**

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH
Fotos von der Jahresversammlung „Rolle der Wissenschaft im Globalen Wandel“: Markus SCHOLZ
Einbandbild: © moZZ – Fotolia.com

**Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint bei der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft Stuttgart, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland.
Jedes Heft ist einzeln käuflich.**

Die Schriftenreihe wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie das Ministerium für Wissenschaft und Wirtschaft des Landes Sachsen-Anhalt.

Wir danken der Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung für die finanzielle Unterstützung der Veranstaltung.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Die Abkürzung ML hinter dem Namen der Autoren steht für Mitglied der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften.

Alle Rechte einschließlich des Rechts zur Vervielfältigung, zur Einspeisung in elektronische Systeme sowie der Übersetzung vorbehalten. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Akademie unzulässig und strafbar.

© 2013 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften
Postadresse: Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale), Postfachadresse: 110543, 06019 Halle (Saale)
Hausadresse der Redaktion: Emil-Abderhalden-Straße 37, 06108 Halle (Saale)
Tel.: +49 3 45 47 23 91 34, Fax: +49 3 45 47 23 91 39
Herausgeber: Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER, Präsident der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften
Printed in Germany 2013
Gesamtherstellung: druckhaus köthen GmbH & Co. KG
ISBN: 978-3-8047-3210-0
ISSN: 0369-5034
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Inhalt

DRENCKHAHN, Detlev, und HACKER, Jörg: Vorwort	7
---	---

Die Erde im Globalen Wandel

GLASER, Rüdiger, und DECH, Stefan: Globaler Wandel aus dem All	11
SCHELLNHUBER, Hans Joachim: Belastungsgrenzen der Erde – Leitplanken für die Menschheit	33
MOSBRUGGER, Volker: Globaler Wandel der Biodiversität	43
MÖLG, Thomas: Spuren des Klimawandels: Von den großen Ozeanen zu den kleinen Gletschern im Hochgebirge	57
RAHMSTORF, Stefan: Der Klimawandel und seine Folgen für das Erdsystem.	71

Herausforderungen des Globalen Wandels

HERTWIG, Ralph: Die Kommunikation von Risiken in einer Welt im globalen Wandel. . .	87
SINN, Hans-Werner: Die europäische Zahlungsbilanzkrise	109
BRAUN, Joachim von: Welternährung im Globalen Wandel.	139
BIESALSKI, Hans K.: Ursachen, Folgen und Möglichkeiten zur Bekämpfung der Weltseuche Nährstoffmangel – <i>Hidden Hunger</i>	159
METTENLEITER, Thomas C.: Prävention von Zoonosen.	193
FEHLHABER, Karsten, und ALTER, Thomas: Sicherung gesunder tierischer Nahrungsmittel	203

Lösungswege von Problemen des Globalen Wandels

ISERMEYER, Folkhard: Dilemma zwischen Energie- und Nahrungspflanzen?	223
KRANER-SCHEIBER, Simone, und SCHNIEKE, Angelika: Perspektiven der Roten Gentechnik. .	249
EDENHOFER, Ottmar, und FLACHSLAND, Christian: Globale Energiewende – Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung	275

PITZ-PAAL, Robert: Solarthermische Kraftwerke in Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika: Ausschöpfung des Potenzials.	297
STEMMERMANN, Peter, und ACHTERNBOSCH, Matthias: Dekarbonisierung im Baustoffsektor . .	313

**Politische und gesellschaftliche Herausforderungen und Lösungswege
von Problemen des Globalen Wandels**

BÖRSCH-SUPAN, Axel: Herausforderungen globaler gesellschaftlicher Veränderungen . . .	335
SIEGRIST, Johannes: Gesundheitspolitische Maßnahmen angesichts der Last chronischer Krankheiten	349
SCHUBERT, Renate: Instrumente zur Vermittlung von Wertewandel und Verhaltensänderungen im nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen der Erde.	367

Vorwort

Der Globale Wandel wird als tiefgreifender vom Menschen ausgelöster Transformationsprozess verstanden. Zu den vielfältigen Herausforderungen des globalen Wandels gehören u. a. Ressourcenverknappung, Klimawandel, Bevölkerungswachstum und Urbanisierung. Diese bilden einen komplexen Gesamtprozess, der nicht isoliert betrachtet werden darf. Bei globalen Umweltveränderungen handelt es sich zum einen um die globale Erwärmung, Entwaldung, Verlust der Biodiversität, Bodendegradation, Versauerung der Meere und andere Prozesse. Aber auch die demographischen Veränderungen wie Bevölkerungsentwicklung und -verteilung sowie die umweltbedingten Gefährdungen der Welternährung und die Ausbreitung neuer Krankheiten müssen mit betrachtet werden.

Dementsprechend ist der globale Wandel ein komplexer, langfristig wirkender Prozess, der in gleichem Maße ökologische wie ökonomische und gesellschaftliche Dimensionen umfasst. Aufgrund der vielfältigen menschlichen Eingriffe in die Natur und die damit verbundenen Veränderungen globaler Stoffkreisläufe finden sich Spuren menschlichen Tuns auch an Orten, die man bislang frei von menschlichen Einflüssen glaubte. Aus diesem Grund erklärten CRUTZEN und STOERMER im Jahr 2000, dass das Zeitalter des Holozäns vorüber und man nunmehr im Zeitalter des Anthropozäns, der Menschenzeit, angelangt sei. Nach ihrer Auffassung ist der Mensch mittlerweile der das Erdsystem maßgeblich beeinflussende und gestaltende Faktor geworden, dessen Einfluss so massiv ist, dass es nur gerecht sei, einen neuen geologischen Zeitraum danach zu benennen.

Globaler Wandel gestaltet sich als Summe vieler Komponenten und Wechselbeziehungen. Die Chancen dieses Wandels zu nutzen sowie die Risiken zu vermeiden, ist für alle Beteiligten in Wissenschaft, Gesellschaft, Wirtschaft und Politik eine große Herausforderung. Gerade in jüngerer Zeit erfährt die Frage nach der Rolle der Wissenschaft im globalen Wandel sowohl unter Wissenschaftlern als auch in der breiten Öffentlichkeit eine stetig wachsende Aufmerksamkeit. Er stellt das System Wissenschaft vor neue Herausforderungen.

Für die Wissenschaft stellt der globale Wandel kein eingrenzbare und disziplinär bearbeitbares Teilproblem dar, sondern überschreitet mit seinen vielfältigen Kreisläufen und komplexen Rückkopplungsmechanismen die Grenzen wissenschaftlicher Disziplinen. Die Faszination der Forschung zum globalen Wandel liegt demzufolge im Zusammenführen des Wissens über Abläufe und Wechselwirkungen des Systems Erde. Dabei wirken Natur- und Lebens- sowie Geistes- und Sozialwissenschaften zusammen. Forschung zum globalen Wandel benötigt innovative Leitlinien und Strukturen und stellt gleichzeitig hohe Ansprüche an Integrationsfähigkeit, Flexibilität und Vorstellungskraft von Wissenschaftlern,

Förderinstitutionen und Nutzern. Der Wissenschaft kommt dabei die Aufgabe zu, gemeinsam mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft Konzepte für eine „klimaverträgliche“ Gesellschaft zu entwickeln, den Weg dorthin zu beschreiben sowie nachhaltige technische und soziale Innovationen zu unterstützen.

Die Jahresversammlung der Leopoldina, die vom 22. bis 24. September 2012 in Berlin stattfand, hat sich mit der Rolle der Wissenschaft im Globalen Wandel auseinandergesetzt. Dabei spannten die Beiträge den Bogen von der Analyse des Ist-Zustandes über eine Beschreibung der Herausforderungen des Wandels bis hin zu Lösungsansätzen und der Diskussion gesellschaftspolitischer Konsequenzen. Die Leopoldina hat sich ganz bewusst den wissenschaftlichen Grundlagen des globalen Wandels gewidmet, denn das Thema drängt. Negative Entwicklungen, wie der Klimawandel, können nicht in Frage gestellt werden. Schwerpunkt der Beiträge der Jahresversammlung bildeten daher auch die Umweltveränderungen und deren Konsequenzen. Der vorliegende Tagungsband enthält ausführliche schriftliche Versionen fast aller auf der Jahresversammlung präsentierten Vorträge.

Wir möchten allen an diesem Tagungsband beteiligten Personen unseren Dank aussprechen. Dieser gilt in erster Linie den Rednern, die uns freundlicherweise die schriftlichen Fassungen ihrer Vorträge zur Verfügung gestellt haben. Darüber hinaus danken wir den Mitarbeitern der Geschäftsstelle der Leopoldina, die an diesem Tagungsband mitgearbeitet haben, sowie den Mitgliedern der Kommission, die die Jahresversammlung vorbereitet hat. Besonders erwähnen möchten wir auch Joachim und Michael KAASCH, die die Erstellung des Tagungsbandes redaktionell betreut haben.

Prof. Dr. Detlev DRENCKHAHN
Senator der
Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER
Präsident der
Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina
– Nationale Akademie der Wissenschaften –

Die Erde im Globalen Wandel

Globaler Wandel aus dem All

Rüdiger GLASER (Freiburg) und Stefan DECH (Oberpfaffenhofen/Würzburg)

Mit 9 Abbildungen



Zusammenfassung

Der „Globale Wandel“ wird ungeachtet natürlicher Veränderungen als der tiefgreifendste Transformationsprozess verstanden, der vom Menschen ausgelöst wurde und in einem noch nicht abschätzbaren Maße auf ihn und das Erdsystem rückkoppelt. Die zentrale Frage ist dabei, inwieweit und in welchen Bereichen der Mensch das System Erde derart überstrapaziert, dass sein „Lebenssicherungssystem“, basierend auf einer sauberen und regenerationsfähigen Umwelt, gefährdet ist (UNEP 2012).

Die teilweise dramatischen Veränderungen, die sich vor allem seit den 1950er Jahren hinsichtlich Entwaldung, Veränderung der Zusammensetzung der Atmosphäre, Urbanisierung, Degradierung und Desertifikation, Landnutzungswandel, Rohstoffentnahme, Meeresverschmutzung, Biodiversität usw. ergeben haben, lassen sich mit Hilfe der Fernerkundung dokumentieren und quantifizieren. Damit kommt der Fernerkundung insbesondere hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Entwicklung und des Monitorings eine wichtige Rolle zu.

Die Fernerkundung eröffnet einen methodischen Zugang, der die großflächige, globale, unabhängige und nahezu zeitgleiche Erfassung und Bewertung der verschiedenen Phänomene möglich macht. Sie bildet damit eine wesentliche Grundlage für die neuen Fragen und Aufgaben, z. B. für globale Wasserbilanzen und virtuellen Wassertransfer, einen gerechten Emissionshandel, Nutzungsentgelte, globale Governance und ein globales Umweltmonitoring, d. h. den notwendigen globalen Ausgleich, der für eine gerechtere und nachhaltige Perspektive steht.

Abstract

Irrespective of natural changes, “global change” is referring to the most profound transformation process ever initiated by humans. Global change will influence the humans themselves as well as the Earth System as a whole to an yet unforeseeable extent. The key question is to what degree and in which areas are people overusing the Earth System such that their “life support”, based on a clean environment capable of regeneration, is endangered (UNEP 2012).

This paper documents through remote sensing image series the often dramatic changes which have occurred especially since the 1950s in areas like deforestation, climate change, urbanization, desertification, land use, resource depletion and ocean pollution. It demonstrates the crucial role of remote sensing in monitoring and quantifying relevant processes, especially their spatial and temporal development.

Remote sensing is a methodology which enables an area wide, global, objective and near real-time recording and assessment of various phenomena. It thereby lays an essential foundation for addressing new issues like the global water balance and virtual water content, and the challenges of fair emissions trading, user fees, global governance and global environmental monitoring, in other words, the global compensation necessary to secure a just and sustainable future.

1. Einleitung

Der „Globale Wandel“ ist der bis dato tiefgreifendste und umfassendste Transformationsprozess, der vom Menschen ausgelöst wurde und in einem noch nicht abschätzbaren Maße auf ihn und das Erdsystem rückkoppelt.¹ Die zentrale Frage ist dabei, inwieweit und in welchen Bereichen der Mensch das System Erde derart überstrapaziert, dass seine ureigene Existenzgrundlage, sein „Lebenssicherungssystem“ basierend auf sauberer Luft und Trinkwasser, fruchtbarem Boden, einer vielfältigen Pflanzen- und Tierwelt, gesunder und ausreichender Nahrung, nachhaltiger Energieversorgung und einer ebensolchen Rohstoffsicherung, gefährdet ist (UNEP 2012). Damit nicht genug. Neben diese Versorgungs- tritt auch eine ebenso drängende Entsorgungsfrage. Müllhalden, Altlasten, devastierte Landstriche, verseuchte Bäche und überbaute Flüsse, *dead zones* in Meeren und Ozeanen, Smog und Feinstaubbelastung der Atmosphäre sind ebenso sichtbare Zeichen unseres Tuns, auch wenn es regional bereits positive Beispiele einer Trendwende gibt (z. B. die Wasserqualität der Flüsse in Deutschland oder die Erholung der Ozonschicht über der Antarktis). Durch die unangepassten Eingriffe und Begehrlichkeiten von uns Menschen sind die Ausrottung von Arten, der Verlust an Biodiversität, Beiträge zur Veränderung des Klimas, Landschaftsdegradation, Desertifikation sowie die Veränderung der Stoffkreisläufe von Ozon, Kohlenstoff und Stickstoff zu drängenden Fragen unserer Zukunftsfähigkeit geworden. Dabei vollziehen sich die Veränderungen in einem nie gekannten Ausmaß und in einem rasanten Tempo, vor allem in den letzten 50 Jahren.

Unübersehbar gibt es mittlerweile eine ganze Reihe von eindeutig erkennbaren Störungen und Belastungen. Dabei hat der globale Wandel ein räumliches Gesicht: In vielen Regionen lassen sich massive Belastungen erkennen, die dort eine Fortführung des bisherigen Lebensstils mit seinen spezifischen Gewohnheiten und kulturellen Gepflogenheiten bereits nicht mehr zulassen. Auf lokaler und regionaler Ebene sind die Auswirkungen dieses Wandels schon lange bekannt, weil drastisch und unmittelbar zu spüren. Ihre kumulative Wirkung auf die globale Dimension ist aber erst in den letzten beiden Jahrzehnten in den Fokus der Menschheit gerückt. Entsprechend stellt sich die Frage, wie die Veränderungen der Erdoberfläche global erfasst und quantifiziert werden können, um eine verlässliche und belastbare Faktengrundlage zu erhalten. Gleichzeitig sollte die Messmethode einen weltweiten Vergleich über standardisierte Parameter ermöglichen.

2. Der „Globale Wandel“ als ein großes Räderwerk im komplex integrierten sozial-ökologischen System der Erde

Die Erde kann als ein sozial-ökologisches System verstanden werden, das zwischen geologischen Komponenten wie Boden, Landoberfläche, Wasser, Biota und Rohstoffen

¹ Globaler Wandel lässt sich definieren als: (a) „[...] a transformation that occurs on a worldwide scale (e.g., an increase in carbon dioxide in the atmosphere) or exhibits sufficient cumulative effects to have worldwide impact (e.g., local species extinction resulting in global loss of biodiversity).“ (b) „[...] Changes in the global environment (including alterations in climate, land productivity, oceans or other water resources, atmospheric chemistry, and ecological systems) that may alter the capacity of the Earth to sustain life.“ (US Global Change Research Information Office 2007.) (c) „Veränderungen der Umwelt, die den Charakter des Systems Erde zum Teil irreversibel modifizieren und deshalb direkt oder indirekt die natürlichen Lebensgrundlagen für einen Großteil der Menschheit spürbar beeinflussen.“ (WBGU 1993.)

sowie sozial-ökonomischen wie Bevölkerung, Wirtschaft, Sozialstruktur und Politik komplex integriert ist. Ein adäquater Analyserahmen zum Verständnis der Erde als sozial-ökologisches System muss entsprechend komplex strukturiert sein (WALKER et al. 2002).

Die Bewertung des globalen Wandels als ein Bevölkerungsproblem ist heute nicht mehr nur eine Frage der Bevölkerungszunahme, -verteilung und -struktur,² sondern viel stärker die nach der Lebensführung und Adaptation von Lebensstilen. Sie bestimmen Art und Umfang der Eingriffe und Beanspruchungen. Umgesetzt werden diese Ansprüche, Werthaltungen durch eine Vielzahl von Prozessen, die als sekundäre Treiber des globalen Wandels angesehen werden können (STEFFEN 2004). Entscheidenden Einfluss hat das Wirtschaftssystem mit Produktion, Marktstrukturen, Handel und Konsum. Die als Globalisierung³ zusammengefasste jüngere Entwicklung hat zu neuen Austausch- und Verteilungsprozessen geführt, eingebettet in kulturelle, soziale, rechtliche und institutionelle Strukturen und Abläufe.

Der globale Wandel wird auch durch wissenschaftliche und technische Innovationen angetrieben. Die Innovation ist ein strukturelles Merkmal von Wandel. Sie kann als ein beständiger Wunsch nach Neuem und dem Wunsch des „sich-unterscheiden-wollens“ angesehen werden. Daraus folgen neue Produkte, die „*must-haves*“, die dem ökonomischen Diktat des Gewinnstrebens unterworfen sind und in der nicht nachhaltigen Produktionsweise einem negativen Pfad folgen. Andererseits sind gerade durch technische Verbesserungen wie Filtertechnik, Energieeffizienz und Dämmschutz, aber auch durch neue konzeptionelle Entwürfe der Nachhaltigkeit und Suffizienz, Verbesserungen in Richtung einer nachhaltigen Entwicklung auf den Weg gebracht worden.

Unser Entscheidungs- und Handlungsrahmen ist wiederum abhängig von der gesellschaftlichen bzw. politischen Struktur, der *Governance*, und den darin möglichen Entscheidungsprozessen, bzw. dem Grad der Partizipation. Wer hält die Macht in Händen, in welcher Art von Gesellschafts-, Rechts- und politischem System leben wir? Welcher kulturelle Hintergrund bestimmt diese mit? Menschliche Unternehmungen im weitesten Sinn beziehen sich letztlich auf die Nutzung und Verteilung von Ressourcen. Neben den klassischen Rohstoffen sind es in ihrer Grundform Luft, Boden, Wasser, Land und die Lebewelt, d. h. Pflanzen und Tiere, die in Produktionsprozesse, vielfältige Nutzungsformen oder Wertungsketten eingebunden sind. Am Ende stehen Rest- und Abfallstoffe, die entsorgt oder in sinnvoller Weise wieder in die Produktionsprozesse integriert werden sollten. Der globale Wandel ist Ausdruck und zugleich der Handlungsrahmen unserer Grundbedürfnisse wie Ernährung, Gesundheit, Bildung, Sicherheit, Mitbestimmung und Mobilität und impliziert Fragen ihrer Umsetzung und nach ihrem Status.

2 Lange wurde das Bevölkerungswachstum als hauptsächliches Problem in Bezug auf die Welternährung angesehen. Wissenschaftlich begründet hat diese Sichtweise der britische Ökonom Thomas Robert MALTHUS (1766–1834) in seinem Aufsatz *The Principle of Population*, in dem er die These aufstellt, dass die Bevölkerungszahl exponentiell wachse, die Nahrungsmittelproduktion aber nur linear. Inzwischen wurde jedoch erkannt, dass sozioökonomische Ursachen einen ebenso großen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln und generell auf die Verwundbarkeit gegenüber widrigen Umweltzuständen und Armut haben (vgl. WATTS et al. 1993, TURNER et al. 2003).

3 Globalisierung wird u. a. definiert als „Prozess der Ausbreitung und Intensivierung weltweiter Beziehungen als Folge strategischen Handelns mächtiger Akteure wie insbesondere transnationaler Unternehmen (TNU) oder einzelner Nationalstaaten“ (GEBHARDT et al. 2001), als „komplexer multidimensionaler Prozess der Entgrenzung und Enträumlichung zum einen, der Verdichtung und Vernetzung zum anderen“ (TETZLAFF 2000).

Gesteuert wird dieses System von Akteuren. Sie lassen sich zum einen identifizieren als Pioniere und Innovatoren, zum anderen als Haushalts- und Familienverbände, soziale Gruppen, als Gewerkschaften, Industrie- und Arbeitgeberverbände, Sozialeinrichtungen oder Bürgerinitiativen auf lokaler, supranationaler, nationaler, regionaler und internationaler Skala – mit jeweils spezifischen Werthaltungen. Ausgestattet mit Macht- und Einflusstrukturen sowie Handlungsoptionen unterschiedlicher Reichweite stimulieren sie verschiedenartige Entwicklungen, definieren Regularien. Während viele der genannten Akteure *bottom-up* agieren und Impulse „von unten“ setzen, wirken andere *top-down*. Zusammenfassend können sie als *Governance*-Strukturen verstanden werden, wobei viele Akteursgruppen und nachgeordnete administrative Einrichtungen eine „mittlere“ Rolle einnehmen. Sie bilden ein hierarchisches Netzwerk aus Meinungen, Werthaltungen, Gesetzen und Regularien, definieren Macht- und Abhängigkeitsverhältnisse. Besonderes Augenmerk ruht daher auf den Interaktionsmustern zwischen diesen Ebenen und den Aushandlungsprozessen sowie dem institutionellen Rahmen, in dem sie stattfinden. Die Vermittlung zwischen diesen Ebenen leitet über zur Frage der Kommunikations- und Informationsstruktur, wie sie sich als immer bedeutsamer in modernen Zivilgesellschaften demokratischen Zuschnitts erweist. Als zentraler Begriff erweist sich dabei die Partizipation.

Zu den Besonderheiten der heutigen Zeit zählt, dass jeder Einzelne als Konsument bewusst oder unbewusst den globalen Wandel im Rahmen der globalisierten Welt mitverantwortet. Wer einen Apfel aus Chile oder Neuseeland in den Einkaufswagen legt, befrachtet die Umwelt mehr als der Kauf von Bodenseeobst. Der kurze Weg über die Ladentheke kaschiert diesen massiven ökologischen und sozialen Fingerabdruck.

Die menschlichen Eingriffe haben zu vielfältigen negativen Einflüssen geführt, die konkret benannt werden können. Sie gelten als die zentralen, großen Themen des globalen Wandels: ein mutmaßlich anthropogener Beitrag zur globalen Temperaturerhöhung durch Veränderung der atmosphärischen Zusammensetzung, regionale Klimaänderungen durch Veränderung der Landnutzung, Verringerung der Ozonschicht durch stofflichen Eintrag in die Atmosphäre, Verlust an Biodiversität durch Vernichtung von Ökosystemen, Landdegradation und Desertifikation durch extensive bzw. technokratische Landnutzung, die Änderung der Stoffbilanzen usw. Sie stellen die „major concerns“, die großen Problemkreise, dar.

Wie lassen sich solche komplexen Vorgänge bilanzieren? Mittlerweile existiert ein breites Bündel von Indikatoren wie der ökologische Rucksack oder der ökologische Fußabdruck ebenso wie der *Living Planet Index*, der auf einzelne Störungsgrade Bezug nimmt, oder mehr didaktisch-konzeptionell auf Ungleichheiten hinweist. Auch in den *Millennium Development Goals* und im *Human Development Index* sind diese direkt oder indirekt mit angesprochen.

Die unmittelbaren Folgen des globalen Wandels für den Menschen wiederum sind vielfältig. Als zentrale Bezugsgröße dient häufig das „Human Well-being“, das menschliche Wohlbefinden und im weiteren Sinne seine Gestaltungsmöglichkeiten. Das *Human Well-being* lässt sich dabei als Gestaltungs- und Entscheidungsrahmen deuten, in dem jeder Einzelne seine Erfüllung in Bezug auf Gesundheit, Sicherheit, soziale Bindungen und Beziehungen, Einkommen und Realisierung seiner Grundbedürfnisse findet. Es wird davon ausgegangen, dass Umweltbedingungen bzw. -faktoren das menschliche Wohlbefinden bestimmen. Der Verlust an Ökosystemdienstleistungen erodiert daher auch die persönlichen Gestaltungsmöglichkeiten, führt zu Störungen und letztlich im Extremfall zum Kollaps.

Auch wenn der Themenkanon des globalen Wandels stark problembefrachtet wirkt – es gibt Perspektiven und Alternativen. In Zukunftsszenarien lassen sich verschiedene Pfade definieren und konzeptionell deklinieren. Es gibt Handlungsalternativen zwischen einem „weiter wie bisher“ über das Nachsteuern im Sinne einer Mitigation und Adaptation, bis zum Gegenmodell einer nachhaltigen Gestaltung der Einsicht, des Ausgleichs und der Genügsamkeit. Dies setzt entsprechende Verhaltensänderungen voraus, quasi ein Nachsteuern unserer Werthaltungen, ein Einstimmen von wissenschaftlichem und technischem Fortschritt, Regulierung und Institutionalisierung. Dabei ist zu beachten, dass solche Gesellschaftsmodelle nicht automatisch im Einklang stehen mit einer liberalen Grundhaltung westlicher Demokratien und dem abendländischen Grundverständnis, dass wirtschaftliches Wachstum gleichsam „Wohlstand für alle“ bedeutet. Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass Wohlstand im heutigen westlichen Sinne erhalten werden kann, ohne gleichzeitig in nicht nachhaltiger Weise Ressourcen auf Kosten künftiger Generationen oder benachteiligter Menschen in Schwellenländern zu nutzen. Das ist an gewisse Voraussetzungen gebunden wie die Notwendigkeit einer globalen *Governance* oder eines globalen Risikomanagements.

Der globale Wandel beinhaltet eine distinkte zeitliche Dimension, eine historische Tiefe, und umfasst das Wechselspiel von Auf- und Niedergang, Erfolg und Misserfolg bzw. Kollaps. Er kennt Gewinner und Verlierer, bietet Chancen und verhindert bisweilen auch die Entwicklung anderer und in anderen Regionen. Kurzfristige und kleinräumige Einwirkungen lassen sich von mittelfristigen, langfristigen und globalen unterscheiden. Sie sind aber nicht losgelöst voneinander, sondern in vielfältiger Weise gekoppelt. Zeitliche Sprünge und Versätze treten dabei auf. Und wenn es so ist, dass der Mensch zu den natürlichen Klimaschwankungen des Systems Erde/Sonne beiträgt und aktuell die Atmosphäre zusätzlich erwärmt, so werden künftige Generationen mit den Folgen der Industrialisierung seit dem 19. Jahrhundert (ZIEGLER 2009) zu kämpfen haben. Und dies zeigt die zeitliche Entkopplung von Verursachern und denen, die die Folgen zu tragen haben. Das zeitliche Auseinanderfallen und sein zeitversetzter Schlagschatten sind ein Charakteristikum und machen die notwendigen Einsichten besonders schwierig.

Global Change hat einen langen Vorlauf, der durch markante Sprungstellen gekennzeichnet ist. Trotzdem erscheint die Entwicklung seit 1950 deutlich von den vorherigen abgesetzt. Sie ist dynamischer, umfassender und grundlegender. Und die Zeitspirale windet sich weiter: die Ausräumung der Landschaft, um der industriell geprägten Agrarwirtschaft mit hohen Düngergaben, dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und neuerdings der Gentechnologie (ohne dies ethisch werten zu wollen) das Feld zu ebenen, die neuen Akzente der Biotechnologie, Nanotechnik und vor allem die IT-bezogene Bewirtschaftung im Rahmen des *Precision Farming* setzen neue Akzente in diesem Spiel.

Das Besondere „geographische“ am globalen Wandel ist, dass er Räume und Regionen neu bewertet. Durch unterschiedliche Ausstattungen, Funktionen und Belastungsgrenzen sind die Teilsysteme *per se*, vor allem aber ihre regionalen Ausprägungen mit einer spezifischen Widerstandskraft bzw. Verletzlichkeit versehen. Auftretende Belastungen, Risiken und Katastrophen werden demzufolge unterschiedlich wahrgenommen, bewertet, im Idealfall gepuffert und bewältigt – oder führen zu Veränderungen, zu anhaltenden Störungen, strukturellen Defiziten, im Extremfall auch zum Kollaps. Indikatoren dieser signifikanten Störungen sind Systemwechsel, Abwanderung, Revolutionen, Krisen und Armut, aber auch Landschaftsdegradation, Desertifikation und Klimawandel. Wobei gerade das Stichwort „Klimawandel“ stets einer grundsätzlichen Einordnung bedarf: denn ohne Frage

ist das Klima auf der Erde hoch variabel. Die aktuelle erdgeschichtliche Warmzeit hat wohl noch nicht ihr natürliches „Optimum“ erreicht. Insofern würde der Mensch auch ohne zusätzlichen anthropogenen Beitrag in jedem Falle Anpassungsstrategien entwickeln müssen. Die Frage im Themenbereich des globalen Wandels ist nur, ob und wie hoch der anthropogene Beitrag an diesen natürlichen Schwankungen ist. Jedenfalls führt dieses „Paket“ an Prozessen zu einem Verlust von Ökosystemfunktionen und kann im ungünstigen Fall zu Defiziten oder gar einer Erosion gesellschaftlich-sozialer Strukturen führen. Das Regionale wird daher stärkere Beachtung finden müssen. Der globale Wandel wird zu neuen räumlichen Mustern und einer neuen Regionalisierung führen.

3. Fernerkundung – den globalen Wandel „im Blick“ haben

Die räumlichen und zeitlichen Muster des globalen Wandels müssen erfasst, quantifiziert und beobachtet werden, um die entsprechenden Prozesse zu verstehen und unerwünschten Effekten adäquat begegnen zu können. Hierbei spielt die Fernerkundung eine besondere Rolle, da mit Hilfe von Satellitenbildern die Erde global, kontinuierlich, objektiv und systematisch erfasst werden kann, um daraus Informationen zu dem Zustand sowie dem zeitlichen und räumlichen Ausmaß von Veränderungen abzuleiten.

Erst vor gut 40 Jahren hat der Mensch durch den Flug zum Mond erstmalig die Erde als Ganzes vom Weltraum aus betrachten können. Dies führte zu dem Bewusstsein, dass die Erde verletzlich ist, als Ganzes betrachtet werden muss, und dass Handeln an einem Ort Auswirkungen an anderen Orten nach sich zieht. „Wir brachen auf, um den Mond zu erkunden. Aber tatsächlich entdeckten wir die Erde“, bringt Eugene CERNAN, Kommandant von Apollo 17, diese Erkenntnis auf den Punkt.

Seit dem ersten Foto der Erde aus dem All hat sich innerhalb von zwei Generationen eine enorme technologische Entwicklung vollzogen, und eine Vielzahl von Satellitensystemen hat sich etabliert, die eine globale und systematische Erkundung des Erdsystems aus dem All ermöglichen. Heute umrunden etwa 120 zivile Beobachtungssatelliten die Erde, und dazu kommen mehr als 550 Kommunikationssatelliten. Das erste Flaggschiff der Erdbeobachtung, die Landsat-Satelliten, liefern seit 1972 kontinuierlich Daten, die mittlerweile zu einem Standard für die Erkundung von Veränderungsprozessen geworden sind. Im Februar 2013 wurde der achte Satellit dieser Reihe erfolgreich gestartet, um die Kontinuität zu bewahren.

Die räumlichen Auflösungen rangieren von ca. einem Kilometer bei geostationären Satelliten wie z. B. Meteosat, der alle 15 Minuten eine Aufnahme macht, bis hin zu räumlichen Auflösungen von bis zu 50 cm Auflösung, z. B. mit WorldView, die die Erde auf fast polaren niedrigen Bahnen umkreisen und durch schwenkbare Systeme und Konstellationen auch zunehmend zeitlich hochaufgelöst neue Daten liefern. Grundsätzlich gilt, dass bei der Satellitenfernerkundung nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt jeder Punkt auf der Erde erfasst werden kann, sondern ein Kompromiss zwischen zeitlicher, räumlicher und spektraler Auflösung gefunden werden muss.

Einer der größten Vorteile der Fernerkundung ist die Sichtbarmachung von Strahlung außerhalb des Sehbereichs des menschlichen Auges. So können zum Beispiel atmosphärische Spurengase wie Ozon mit höchster Genauigkeit abgeleitet werden. Im Vergleich zu den Bodenmessungen kann Ozon beispielsweise mit Hilfe des GOME (*Global Ozone*

Monitoring Experiment)-Sensors heute mit einer Genauigkeit von etwa einem Prozent im Vergleich zu Bodenmessungen erfasst werden (LOYOLA et al. 2011).

Spurengase kommen zudem bei der Modellierung von Schadstofftransport und -ausbreitung zum Einsatz, indem dadurch die aktuelle Situation in die Modellrechnung integriert wird. Der Einsatz der Fernerkundung in Wettervorhersagemodellen in den letzten drei Jahrzehnten führte zu einer immensen Verbesserung der Vorhersagegenauigkeiten in der Meteorologie.

Während in der Meteorologie der Einsatz der Fernerkundung schon lange etabliert ist und die Kontinuität der Daten langfristig über Satellitengenerationen gesichert ist, sind entsprechende fernerkundungsbasierte Parameter für die Beobachtung der Prozesse an Land noch in den Anfängen. Von der NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) werden jedoch als eine der ersten Institutionen seit einigen Jahren global auf der Basis der MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) – Daten der Satelliten Aqua und Terra unterschiedliche Parameter in regelmäßigen Abständen (8-tägig bis jährlich) abgeleitet und zur Verfügung gestellt wie z. B. Landoberflächentemperaturen, Nettoprimärproduktion, Schneebedeckung, Vegetationsaktivität usw. (<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>).

Um biophysikalische Parameter in ihrer zeitlichen Dynamik abbilden zu können, werden auch hier häufig Modelle zu Hilfe genommen und Fernerkundungsdaten assimiliert. So werden beispielsweise bei der Berechnung der Nettoprimärproduktion (NPP) MODIS-Daten genutzt. Über die zeitliche Änderung der NPP als Maß für die Vegetationsaktivität können saisonale Effekte und das „Ergrünen“ der Landschaft quantitativ erfasst werden. Der Vergleich mehrerer Jahre gibt dann Hinweise auf ein früheres oder späteres Einsetzen der Vegetationsperiode aufgrund klimatischer Veränderungen. Darüber hinaus kann der in der Vegetation gebundene Kohlenstoff quantifiziert werden (eine neuere Arbeit zum Beispiel von EISFELDER et al. 2012).

Deutschland spielt eine führende Rolle im Bereich der Radartechnologie mit den beiden nationalen Missionen TerraSAR-X und TanDEM-X. Mit Hilfe dieser Daten wird am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ein globales Höhenmodell erstellt, das als Basis für Veränderungsprozesse und geowissenschaftliche Studien dienen wird. Mit einer räumlichen Auflösung von 12 m wird es die bisher beste Auflösung und höchste Genauigkeit eines globalen Höhenmodells besitzen (GRUBER et al. 2012). Aus diesen global vorhandenen Radardaten lassen sich auch weitere Parameter der Landbedeckung, wie beispielsweise die Siedlungsfläche, automatisiert extrahieren. Damit wird ein bisher einmaliger standardisierter Datensatz geschaffen als Basis zur weltweiten Analyse der urbanen Strukturen und ihrer Änderungen (ESCH et al. 2012).

Radardaten bieten darüber hinaus jedoch noch enormes Potenzial bei der Beobachtung kleinster Veränderungen der Erdoberfläche im Millimeterbereich. Mit Hilfe von mehreren Radardaten können kleinste Veränderungen detektiert werden, wenn beispielsweise durch Bergbau oder Wasserentnahme Bodenabsenkungen oder in Vulkangebieten Bodenhebungen stattfinden (EINER et al. 2013).

Die Fernerkundung ermöglicht zwei wesentliche Bedingungen für die Erfassung des globalen Wandels: Es werden mit derselben Methodik weltweit Daten aufgenommen, die standardisiert zu vergleichbaren Parametern verarbeitet werden können, und diese Datenaufnahme erfolgt auch zeitlich kontinuierlich, so dass eine detaillierte Analyse von Veränderungsprozessen möglich wird. Dies alles bietet die Grundlage, um Veränderungen sicht-

bar zu machen, stattfindende Prozesse als Trends zu erkennen, Modellrechnungen und Postulate zu überprüfen. Diese neutrale „Wächter-Rolle“ der Fernerkundung (die zukünftigen Satelliten der ESA heißen „Sentinels“, engl. Wächter) hat deswegen im Kontext der Forschung zum „Globalen Wandel“ eine besondere Bedeutung.

4. Fallbeispiele – Schauplätze

Nachfolgend sollen anhand einer Auswahl von anschaulichen Bilddaten zum einen die thematische Breite, die Dimension und die augenfälligen Veränderungen dargestellt, zum anderen aber auch das Potenzial von Fernerkundungsdaten hervorgehoben werden.

Die Bilddaten offenbaren dabei die visuelle Dimension, optimiert durch die Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Das Medium bringt es mit sich, dass uns dabei viele der besonders virulenten Probleme unserer Zeit in einer geradezu faszinierenden Ästhetik gegenüber treten. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich um die besonders kritischen und zum Teil schon überstrapazierten Probleme und Themenkreise unserer Zeit handelt.

4.1 Anthropogen verursachter Klimawandel

Der Klimawandel und die daraus resultierenden Folgen sowie die entsprechenden Anpassungsmaßnahmen sind eines der herausragenden Themen und Herausforderungen unserer Zeit. Dabei wurde oben schon ausgeführt, dass „Klimawandel“ – bzw. um dies nochmals zu präzisieren, die Veränderung der globalen Temperatur als Funktion langer Zeiträume (>30 Jahre) – ein natürlicher Prozess ist, der allerdings nach dem heutigen Stand der Forschung mit großer Wahrscheinlichkeit durch menschliche Aktivitäten in Richtung einer beschleunigten Erderwärmung verstärkt wird.

Aus dem weiten Feld von Indikatoren zum Klimawandel sind die augenfälligen Veränderungen von Eis- und Schneeflächen besonders markant. So hat im Jahre 2012 der Rückgang des arktischen Meereises wieder einmal zu einem Rekordminimum geführt. Anhand der auf Satellitenbildern beruhenden Zeitreihe von 1980, 1990 und 2010 kann die Veränderung der Eisfläche eindrucksvoll dokumentiert werden (Abb. 1). Der Klimawandel ist Realität, und er wird augenfällig im globalen Rückgang von Eis- und Schneeflächen. Nur wenige, regional begrenzte andersartige Entwicklungen brechen diesen Trend. Dabei muss auch hier wieder angemerkt werden, dass ein unstrittiger kausaler Zusammenhang zwischen anthropogener Temperaturerhöhung und dem aktuellen Rückgang des arktischen Meereises nicht hergestellt werden kann, auch wenn es sehr wahrscheinlich ist, dass der Mensch hierzu einen Beitrag leistet. In der vorliegenden Bildsequenz ist der Rückgang als Zeitreihe belegt – ein Befund, der ohne Fernerkundungsdaten in dieser Form nicht abbildbar wäre. In der Beweissicherung der Folgen des Klimawandels wäre damit ein wesentliches Element nicht verfügbar. Durch die flächenhafte und kontinuierliche Beobachtung mit Satellitenbildern wird eine Datenbasis geschaffen, die mit traditionellen stichprobenhaften Punktmessungen nicht zu vergleichen ist.

Die mit dem Rückgang des arktischen Meereises einhergehenden klimatischen Folgewirkungen können nur cursorisch angesprochen werden. Der Rückgang des Meereises impliziert eine Veränderung der Reflexionseigenschaften und trägt erheblich zur überdurchschnittlichen Erwärmung der Arktis bei. Damit einher geht auch das Auftauen des

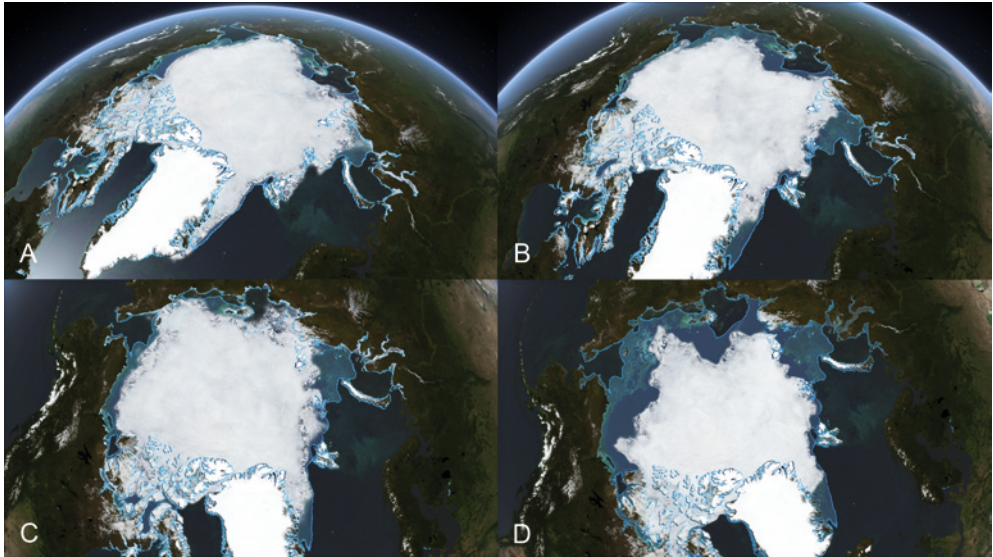


Abb. 1 Rückgang der arktischen Eisbedeckung, beginnend mit (A) 1980 über (B) 1990, (C) 2000 bis (D) 2010. (Datenquelle: GMES My Ocean)

Permafrostes, das zur Destabilisierung von Hängen und von Bodensubstraten führt. Die Implikationen auf Infrastruktur, Häuser, Fahrwege und die Lebensverhältnisse der indigenen Völker, die in dieser Region leben, sind vielfältig.

Eine weitere mögliche Auswirkung liegt in der Abschwächung oder gar Unterbrechung der thermohalinen Tiefenwasserproduktion. So gesehen, umfasst die Region gleich mehrere Kippschalter des globalen Klimaregimes (BOYSEN 2007).

Eine geradezu geopolitisch strategische Dimension erfahren die Änderungen, wenn durch den Rückgang des Eises von den Anrainerstaaten ein Wettlauf auf die möglichen Rohstoffe in der Arktis und damit um territoriale Rechte ausgetragen wird. Neben der möglichen Rohstoffgewinnung steht ein weiterer Aspekt im Vordergrund: die mögliche Nordwest- bzw. Nordostpassage, ein Desiderat, das seit mehreren Jahrhunderten die Menschen beflügelt.

Am Beispiel des Rückganges des arktischen Meereises kann man daher nicht nur die vielfältigen ökologischen Implikationen bis hin zur Beeinflussung der thermohalinen Tiefenwasserproduktion analysieren, es ist auch ein Paradestück, wie sich durch klimatische Veränderungen geostrategische und geopolitische Begehrlichkeiten wecken lassen, die gegebenenfalls zu neuen territorialen Konflikten Anlass geben können.

4.2 Atmosphärische Inhaltsstoffe

Mittlerweile existiert ein breites Spektrum von flugzeuggestützten und satellitengetragenen Fernerkundungssensoren, über die die verschiedenen Inhaltsstoffe und Zustände der Atmosphäre global erfasst werden können. Von besonderer Bedeutung und in der Öffentlichkeit angekommen, ist die Frage der Ozonkonzentration bzw. des Ozonlochs. Darüber hinaus lassen sich Stickoxide, die Schwefeldioxidverhältnisse, aber auch der Wasserdampfgehalt, die Wolkendichte und andere klimatologisch wie auch lufthygienisch relevante Informationen

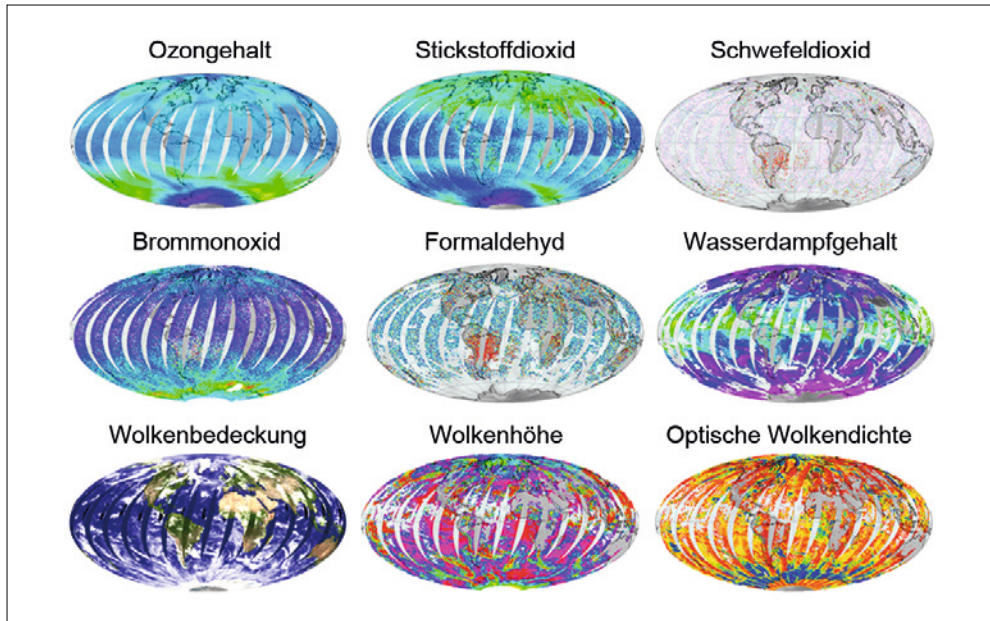


Abb. 2 Auf Basis von Fernerkundungsdaten berechnete atmosphärische Größen. (Quelle: DLR, <http://atmos.caf.dlr.de>, verändert.)

in regelmäßig wiederkehrenden Zeitabläufen dokumentieren und für weiterführende wissenschaftliche Analysen einsetzen (Abb. 2).

Die lufthygienischen Verhältnisse und deren Auswirkungen auf entsprechend disponierte Menschen sind ein Zukunftsthema. Die Zunahme allergischer Reaktionen ist ein Problem, aber auch das allgemeine Wohlbefinden ist ein wesentliches Anliegen geworden. Die fragile Atmosphäre, die schützende Hülle unserer Erde, ist durch vielfältige stoffliche Beimengungen in den letzten Jahren in einen „gestörten“ Zustand versetzt worden, wenn man den Einfluss des Menschen als „Störung“, im Gegensatz etwa zu einem massiven Vulkanausbruch oder Meteoriteneinschlag, bezeichnen will. Die Fernerkundung hilft, diesen stofflichen neuen Beimengungen auf die Spur zu kommen. Mit Hilfe von Fernerkundungsdaten, die in Modelle gespeist werden, können Schadstoffausbreitungen und -konzentration auch prognostiziert werden.

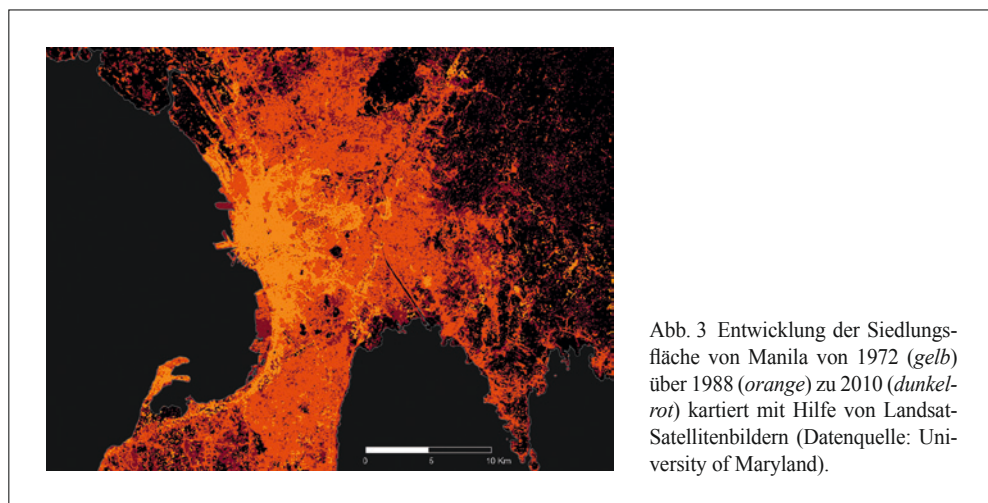
4.3 Urbanisierung

Die Bevölkerungsentwicklung ist der maßgebliche Treiber des globalen Wandels. Ein Teilaspekt der Bevölkerungsentwicklung ist die Urbanisierung, einer der neuen Megatrends. Schon heute leben mehr als 50% der Menschen in Städten, dabei ist der Trend zu sogenannten *Megacities*, d. h. städtischen Agglomerationen mit mehr als zehn Millionen Einwohnern, mit großer Geschwindigkeit vorangegangen. Bis 2050 werden Prognosen zufolge mehr als zwei Drittel der Menschheit in Städten leben. In konkreten Zahlen werden das rund 3 Milliarden mehr als heute sein. Ein Großteil dieser Entwicklung entfällt auf die Entwicklungsländer bzw. die sich entwickelnden Staaten. (In den reichen Ländern wird nur ein verhaltener Trend erwartet.) Die damit einhergehende flächenhafte Inanspruch-

nahme des Raumes, die vielfältigen Implikationen bezüglich der Infrastruktur, aber auch die Frage der *Governance*, der Regierbarkeit in solchen neuen Agglomerationen, stellen Stadtplanung und Wissenschaft gleichermaßen vor Herausforderungen.

Manila ist eines der Beispiele für viele andere Agglomerationen der dritten Welt bzw. der Schwellenländer, die in den letzten Jahrzehnten eine dramatische Zunahme erfahren haben. Die vielfältigen Probleme, wie der Mangel an Infrastrukturmaßnahmen, die starke Überhitzung der Städte, ebenso wie die Frage der Ver- und Entsorgung sowie Sicherheitsaspekte stellen die Planung vor immense Probleme, zumal die einzelnen Entwicklungen derart dramatisch ablaufen, dass eine strukturelle Verbesserung und ein Mitwachsen der notwendigen Rahmenbedingungen oft kaum möglich sind. Gleichzeitig muss aber festgestellt werden, dass die Konzentration von Menschen in Ballungszonen den Flächenverbrauch pro Kopf sinken lassen und somit indirekt auch zu einer Entlastung ländlich geprägter Regionen führen kann. Hier sieht man, dass einfache Kausalketten zu kurz greifen und der globale Wandel in hohem Maße als komplexes System von Rückkoppelungen in Raum und Zeit verstanden werden muss.

Mit Hilfe einer klassischen Methode der Fernerkundung, der Klassifikation von Satellitenbildern in Landbedeckungsklassen, kann die zeitliche Dynamik, aber auch die räumliche Ausdehnung der Siedlungsfläche genau bemessen werden. Innerhalb von nur drei Jahrzehnten hat sich die Fläche von Manila um mehr als das Siebenfache vergrößert (Abb. 3).



Globale Untersuchungen der räumlichen Entwicklung von Megacities mit Hilfe von optischen Satellitendaten über die letzten drei bis vier Dekaden zeigen, dass deren Ausbreitung in Entwicklungsländern besonders stark ist (Kinshasa-Brazzaville, Kairo, Mumbai, Manila), während die Megacities Nordamerikas oder Europas (New York oder London) keine starke Flächenentwicklung mehr zeigen (TAUBENBÖCK et al. 2012).

4.4 Landschaftsdegradation – Desertifikation

Die Desertifikation zählt zusammen mit der Landschaftsdegradation zu den weiteren Brennpunkten des globalen Wandels. Die Desertifikation ist dem Begriff nach vor allen

Dingen auf die trockeneren Regionen der Erde bezogen. Beide Begriffe sind unter den etwas populistischen Schlagworten wie „die Wüsten wachsen“ oder „schreiten voran“ in die breite Öffentlichkeit getragen worden.

Die Wahrnehmung von Degradation ist an die Nutzung des Naturraumes durch den Menschen geknüpft. Die Fernerkundung kann Zustandsgrößen liefern und Veränderungsprozesse von Landbedeckung sichtbar machen, jedoch muss die Bewertung, ob es sich hierbei um einen natürlichen Zustand bzw. Vorgang aufgrund klimatischer Schwankungen oder pedogener Gegebenheiten handelt, mit Hilfe zusätzlicher, z. B. sozioökonomischer, Informationen erfolgen.

Das erste Bildbeispiel (Abb. 4A) zeigt Landdegradation im südlichen Afrika. Dort führen geringe Niederschläge und intensive landwirtschaftliche Nutzung, verbunden mit einem ständigen Bevölkerungsdruck, in den Dörfern im südlichen Botswana zu einem Verlust an Vegetation und infolgedessen zu fortschreitender Bodenerosion. Dadurch verschlechtern sich die geoökologischen Rahmenbedingungen mit direkten Auswirkungen auf die Nahrungssicherung und leisten in einer ohnehin prekären Gesamtsituation Vorschub für weitere virulente Themen wie Armut und Unsicherheit, die sich letztlich in Abwanderung und Konflikten entladen.

Im zweiten Bildbeispiel (Abb. 4B) ist eine ähnliche Landschaftsformation am Südrand der Sahara abgebildet. Die einzelnen Siedlungen ragen deshalb hervor, weil um sie herum intensive Wüstungsinseln entstanden sind, die zunächst wiederum aus der Negativspirale von Abholzung und der damit verbundenen Bodenerosion und Landdegradation gebildet werden. Oft greifen die gleichen Mechanismen, wenn Eigentumsrechte, Zugangsrechte oder falsche Leitbilder die vormals angepassten Gesellschaften transformieren.

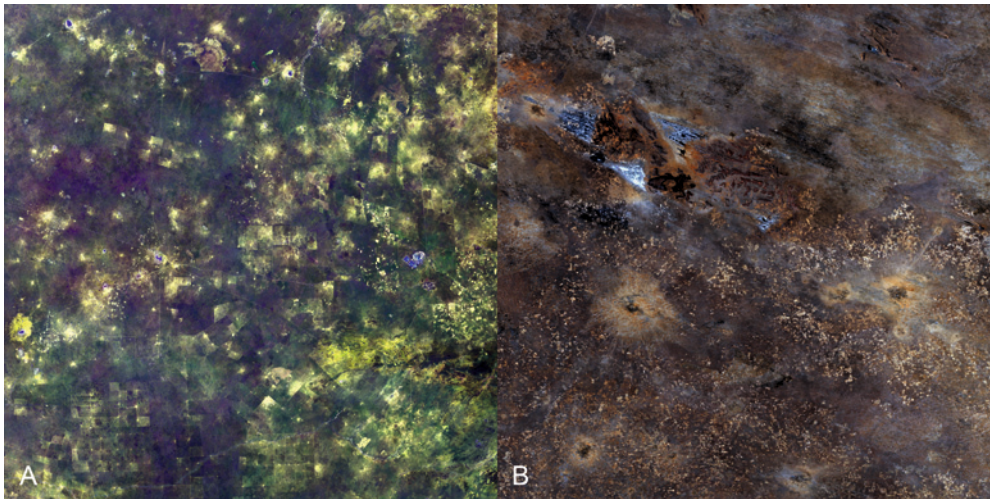


Abb. 4 Landdegradation im südlichen Afrika wird sichtbar mit Hilfe von Landsat-Bildern: Rund um die Dörfer kommt es zu einem Verlust an natürlicher Vegetation und zu Bodenerosion aufgrund geringer Niederschläge und intensiver Nutzung in Botswana (links ein Ausschnitt von ca. 100 km Breite) ebenso wie im Sudan (rechts ein Ausschnitt von 40 km Breite). (Datenquelle: University of Maryland)⁴

4 Die Bilder aus Abb. 4, 5, 7, 8 und 9 sind dem Buch DECH et al. 2008 entnommen.

4.5 Biodiversität

Der Verlust an Biodiversität wird als einer der besonders brisanten Themenkreise diskutiert (ROCKSTRÖM et al. 2009). Darunter fallen vor allem der Rückgang von Arten sowie der damit einhergehende Verlust an Genpotenzial bzw. Ökosystemfunktionen und Ökosystemdienstleistungen. Besonders eindrucksvoll lässt sich dies am Beispiel der Entwaldung darstellen (FLITNER et al. 2011).

Die Bildsequenz zeigt im vorliegenden Beispiel (Abb. 5), wie vor allem in den letzten 30 Jahren rund 80% der Mangrovenbestände im Golf de Fonseca an der Pazifikküste von Honduras zerstört wurden, um Aquakulturen Platz zu schaffen. Dieser Trend ist nicht nur auf Honduras beschränkt, sondern trifft auch für Bereiche in Vietnam oder in Thailand zu. Mittlerweile gilt die Hälfte der weltweiten Mangrovenbestände als verloren. Dies ist besonders dramatisch, weil in den Mangrovenwäldern eine Vielzahl von Kleinstlebewesen existiert, viele Fische und andere Meerestiere ihre „Kinderstube“ haben und die Wälder für den natürlichen Küstenschutz eine wichtige Rolle spielen. Die Bildsequenz zeigt auch, in welcher kurzer Zeit diese Veränderungen vor sich gehen. Im vorliegenden Fall ist der Mangrovenwald 1976 noch völlig intakt. Mit dazu beigetragen hat, dass in diesem Zeithorizont internationale Organisationen wie die FAO Aquakulturen als große wirtschaftliche Chance für Entwicklungs- und Schwellenländer angesehen haben. Die Weltbank förderte weltweit die Ausweitung und die Etablierung von Aquakulturen mit den zum Teil verheerenden Folgen. Mit der Einrichtung einher geht aber eine starke Verschmutzung, u. a. durch die Beimengungen von Nahrungsmitteln, aber auch von Antibiotikagaben, um die Kulturen möglichst wirtschaftlich zu optimieren.

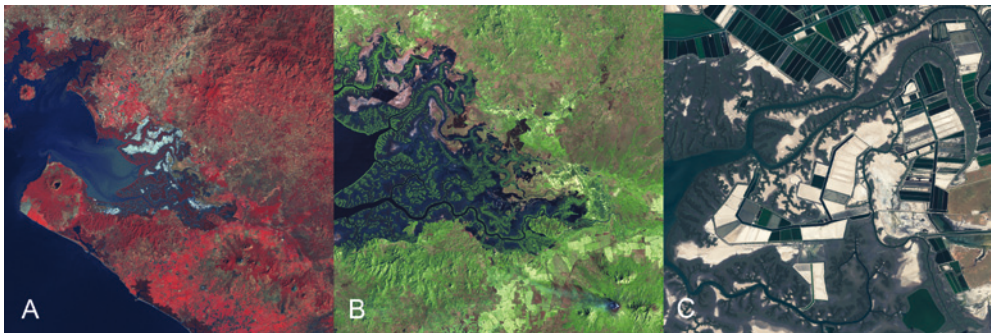


Abb. 5 Veränderungen des Golf de Fonseca von (A) 1976 (die ca. 56 km breite Bucht) zu (B) 1987 (Zoom in die Bucht) zu (C) 2002 (ein 7,5 km breiter weiterer Zoom). Innerhalb von 30 Jahren wurden 80% der Mangrovenbestände von Honduras vor allem für die Shrimps-Produktion zerstört. Satellitenbild (A): Landsat-4, (B): Landsat-5, (C): Ikonos (Datenquelle: University of Maryland, Global Land Cover Facility [GLCF], GeoEye)

4.6 Küstenänderungen

Seen, Meere und mit ihnen die Küsten stehen durch die Folgen des globalen Wandels unter großem Anpassungsdruck. Neben deren Überdüngung und der dortigen Abfallentsorgung bedeuten auch für diese Räume die Folgen des Klimawandels, namentlich die Erwärmung

und Versauerung eine Belastung. Ölkatastrophen führen darüber hinaus immer wieder deutlich die enge Verwobenheit bzw. Kritikalität von Rohstoffnutzung und Umweltgefährdung vor Augen. Insgesamt sind heute nach Schätzungen lediglich 4% der Meere frei von anthropogenen Beeinflussungen (BIELLO 2008).

Die Küstenänderungen werden derzeit als eigener Syndromkomplex verstanden (NEWTON et al. 2012). Insbesondere Delta-Regionen stellen oft einen besonders günstigen Siedlungsraum dar, da hier fruchtbares Land, der Zugang zu den Ressourcen von Fluss und Meer, einfache Transportmöglichkeiten und flaches Gelände für Siedlung zur Verfügung stehen (KÜNZER und RENAUD 2012).



Abb. 6 Das Delta des Gelben Flusses (A) 1976 und (B) 2010 und (C) die Veränderungen von 1976 zu 2010 mit Hilfe von Landsat-Satellitenbildern. Mit Hilfe der Fernerkundung kann sowohl der Flächenzuwachs vor der Küste (grün) sowie der Flächenverlust (rot) kartiert werden. Ebenfalls deutlich erkennbar ist die Umleitung des Flusslaufes, die zu dieser Veränderung geführt hat. (Datenquelle: University of Maryland)

Die Bilder vom Gelben Fluss in China (Abb. 6) zeigen wie mannigfaltig die Veränderungen in Deltaregionen vor sich gehen. Augenfällig sind zunächst die Kanalisierung und die Umleitung des Gelben Flusses, was nachhaltige Veränderungen des Sedimenthaushaltes und damit auch der Küstenstruktur zur Folge hat. Gleichzeitig lässt sich das Voranschreiten des Siedlungswachstums erkennen, die Einrichtung von Hafenanlagen und von Gewerbegebieten, die Ausweitung von Wasserflächen sowie letztlich die morphologischen Veränderungen des Deltabereiches. Die Bildsequenz verdeutlicht, wie sich ökologische Veränderungen und anthropogene Eingriffe die Hand geben und sich wechselseitig beeinflussen.

4.7 Der „Hunger“ nach Rohstoffen

Der Run auf Rohstoffe und damit die Frage der Endlichkeit von Ressourcen bestimmt mittlerweile das politische Tagesgeschäft. Nur so ist zu verstehen, dass heute die Rohstoffentnahme auch in den entlegeneren Winkeln der Erde stattfindet und unter großem Aufwand – zudem oft in sensiblen Ökosystemen raumgreifend – in Erscheinung tritt.

Im vorliegenden Beispiel sind es die Ölsande (Abb. 7), die im Norden der kanadischen Provinz Alberta abgebaut werden. Es handelt sich um die größten Reserven dieser Art weltweit, und sie versprechen einen ökonomischen Nutzen, der durch die gestiegenen Ölpreise mittlerweile auch in dieser Region einen Abbau ökonomisch rechtfertigt. Die damit einhergehenden Problemlagen sind sehr vielfältig. Ohnehin in einem fragilen Ökosystem

ausgebildet, muss für die Nutzung borealer Nadelwald in großem Umfang gerodet werden. Immense Bodenbewegungen sind notwendig, um an den begehrten Rohstoff zu gelangen. Für die Gewinnung sind ein hoher Energieaufwand und insbesondere der Einsatz von großen Mengen Wasser notwendig. Die damit einhergehende Belastung der Umwelt ist sehr komplex und vielfältig. Neben der direkten Zerstörung der Waldflächen und den Aufhaldungen ist vor allem die Wasserbelastung und Wasserverschmutzung zu kritisieren. Damit nicht genug, die Einrichtung der Tagebaustätte hat die Sozialstruktur der Region nachhaltig verändert. Von den Vorhaben sind u. a. die Rechte indigener Bevölkerungsgruppen tangiert. Gleichzeitig explodieren selbst in einer derart entlegenen Stadt im Norden von Alberta die Hauspreise in einer nie gekannten Dimension, und eine allenthalben spürbare Goldgräberstimmung treibt ihre Blüten.

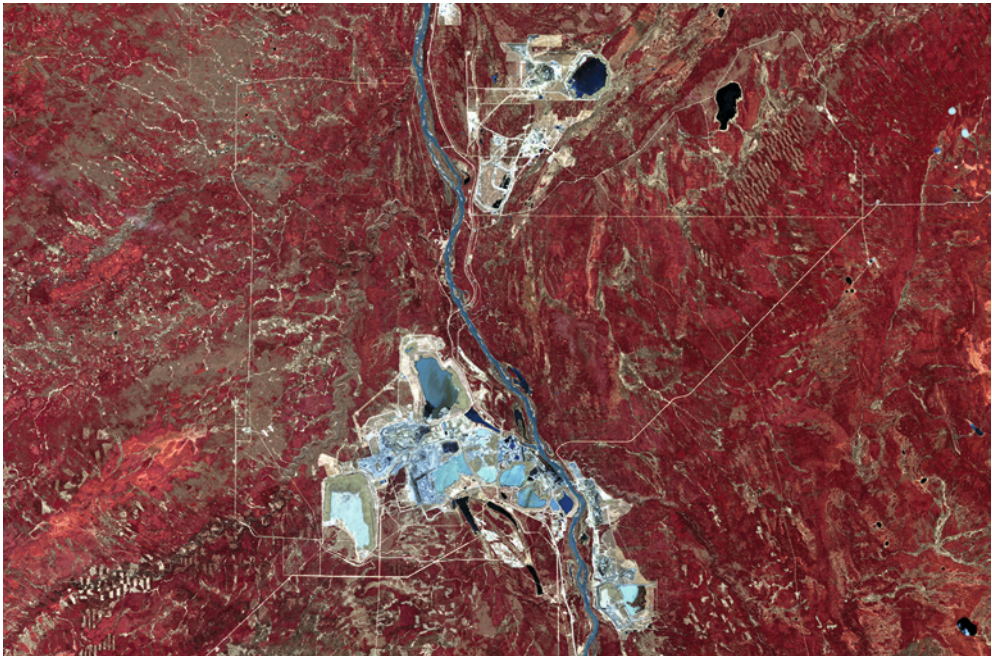


Abb. 7 Diese Satellitenbilddaufnahme macht das Ausmaß des Abbaus der Ölsande am Athabasca-Fluss in Kanada sichtbar. Die maximale Abbaubreite des südlichen Feldes beträgt derzeit fast 40 km. (Datenquelle: University of Maryland)

Die punkthaften Eingriffe, wie sie im Kupfertagebau von Chuquicamata in Chile auftreten, erweisen sich wie „kariöse Löcher“ im Landschaftsbild der Erde (Abb. 8). Die Entnahme der begehrten Erze und ihre Verhüttung haben eine Grube gewaltigen Ausmaßes erzeugt. Auf einer Fläche von etwa 13 km² wurde das Gestein bis auf eine Tiefe von über 850 m abgebaut. Für eine Tonne Kupfer müssen rund 1000 Tonnen Roherz verarbeitet werden. Beim Gewinnungsprozess werden giftige, im Erz von Natur aus vorkommende Elemente wie Schwefel, Arsen, Blei und Cadmium frei. Hinzu kommen Schadstoffe aus dem Produktionsprozess. Stäube, die Abgase und die Abwässer sowie die Abraumhalden führen zu massiven Umweltbeeinträchtigungen. Trotz eines gestiegenen Umweltbewusstseins und der entsprechenden Normen bleibt die Lage im vorliegenden Fall prekär.



Abb. 8 Eines der größten Kupfer-Abbaubereiche liegt bei Chuquibambilla im Norden Chiles. Die Mine ist 850 m tief und umfasst eine Fläche von 13 km². (Datenquelle: DigitalGlobe)

4.8 Bewässerungslandwirtschaft in der Wüste – Agrarproduktion um jeden Preis

Die steigende Bevölkerung wird auch in Zukunft auf Agrarprodukte angewiesen sein. Sie sind die Basis und das Rückgrat der Ernährungssicherung und damit eine wesentliche Facette unseres *Well-being*. Landwirtschaft hat von allen menschlichen Eingriffen auf der Erde flächenmäßig den größten Anteil, wobei die Art und Weise, wie die landwirtschaftliche Produktion erfolgt, ein sehr breites Spektrum aufweist. Kleinteilige, kulturhistorisch hinterlegte, auf Nachhaltigkeit basierende ökologische Agrarproduktion kann ein wesentliches Element der kulturellen Mannigfaltigkeit und im besonderen Maße auch Träger biologischer Vielfalt sein und ist daher als zukunftsweisend zu bezeichnen, auch wenn damit günstige Massenprodukte nicht erzeugt werden können. Quasi am anderen Ende steht die industrielle Agrarproduktion mit hohem Einsatz von Düngergaben, Pestiziden sowie Herbiziden, der Verwendung von genveränderten Materialien sowie der intensiven Bearbeitung mittels großtechnischer Geräte, die ihrerseits zur Verdichtung der Böden und damit zur Degradation mit beitragen. Die Vorteile sind sicherlich große Mengen, die zu günstigen Preisen angeboten werden. Die Folgewirkungen, wie Bodenerosion, Artenrückgang sowie eine zunehmende Verflachung der angebauten Produkte und der eingesetzten Tierrassen, sind ein weiterer negativer Trend im globalen System.

Besonders problembelastet sind jedoch die Bereiche der Agrarwirtschaft, die zusätzlich auf einer intensiven Bewässerung beruhen und das zum Teil in geradezu groteskem geökologischem Gesamtzusammenhang, der selbst ökonomisch keinen Sinn macht. Es sind positivistische Denkweisen, Autarkiebestrebungen und nationale Selbstinszenierungen, die beispielsweise kreisrunde sogenannte *Center-pivot*-Bewässerungsanlagen in der Wüste einrichten lassen, wie in Abbildung 9 im linken Bild zu sehen ist. Die Kreisbewässerungsanlagen in der saudi-arabischen Wüste sind geökologischer Unsinn, weil sie entweder mit fossilem Wasser oder mit kostbarem Nass aus Meerentsalzungsanlagen beschickt werden müssen. Für die ohnehin vom Import abhängigen Volkswirtschaften liefert diese

Form der Landwirtschaft keinen sinnvollen Beitrag. Darüber hinaus ist auch aus ökonomischer Sicht diese Nutzungsform zu hinterfragen, so pittoresk sie auch sein mag. Ein weiteres Beispiel finden wir in den südlich von Madrid in Spanien gelegenen Meseten, wo ebenfalls diese Form der Bewässerungslandwirtschaft angewendet wird und das Landschaftsbild dominiert. Mit dem Bewässerungswasser werden zugleich die notwendigen Düngergaben an die Pflanzen weitergegeben, um einen optimalen Wuchs zu gewährleisten. Die intensive Rotfärbung in den sogenannten Falschfarbenbildern von optischen Satellitendaten (Abb. 9B) zeigt die Vitalität der grünen, gesunden Vegetation an und gibt Experten Hinweise über Ertragsunterschiede zwischen den Flächen und auch innerhalb der Flächen.

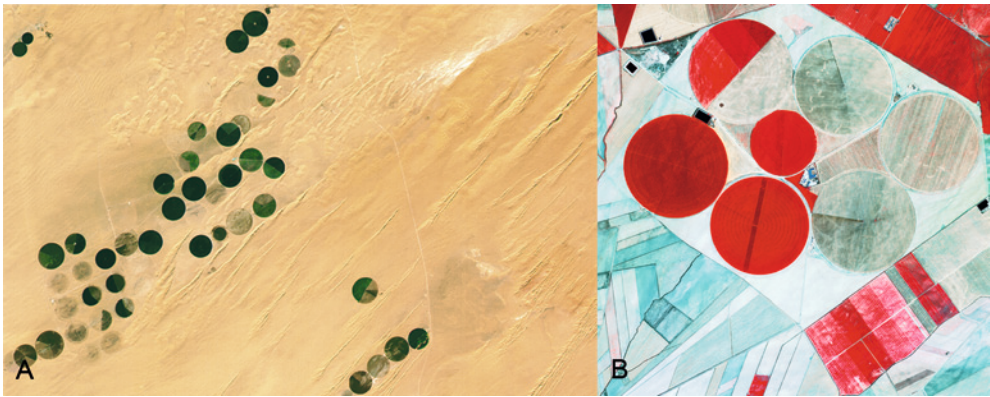


Abb. 9 Weltweit wird Wasser genutzt, um die landwirtschaftliche Produktion auch in von Natur aus ungeeigneten Gebieten zu ermöglichen: (A) Bewässerungskreise mit einem Durchmesser von mehr als einem halben Kilometer in der Wüste von Saudiarabien anhand eines Landsatbildes und (B) ein Falschfarbenbild eines Ikonos-Bildes von Bewässerungsflächen südlich von Madrid in Spanien. In Rot wird grüne Vegetation dargestellt. Die Intensität der Farbe erlaubt eine Aussage über die Vitalität der Pflanzen. (Datenquelle: University of Maryland, GeoEye European Space Imaging [EUSI])

Die Fragwürdigkeit solcher Bewässerungspraktiken wird sicherlich in einem enger werdenden Handlungsrahmen der globalen Veränderungen zu diskutieren sein. Allerdings muss man immer wieder hinterfragen, mit welchem Recht die westlichen Demokratien Empfehlungen an andere Länder geben, obgleich gerade die westlichen Länder in erheblicher Weise die verfügbaren natürlichen Ressourcen nutzen bzw. in historischer Zeit genutzt haben. Eine Neubewertung derartiger Einrichtungen ist natürlich sinnvoll. Global wird ganz offensichtlich zu viel Wasser in die Landwirtschaft gepumpt, insbesondere für einfache Anbauprodukte, wie beispielsweise Alfalfa-Gras, eine Futterpflanze, die lediglich für die Rindermast Verwendung findet.

Wenn in einem Zukunftsszenario Bewässerungslandwirtschaft einen Stellenwert haben soll, dann kann dies nur für höherwertige Produktgruppen, d. h. für Gemüse- und Obstbau, gelten. Im Rahmen von virtuellen Wasserbilanzen werden dann aber die Sinnhaftigkeit und die realen Inputs und Ressourcenbeanspruchungen mit quantifiziert werden müssen, um so zu einer ökologisch nachhaltigeren und auch ausgeglicheneren Welt zu kommen.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Fernerkundung ermöglicht die großflächige, unabhängige, zeitnahe Erfassung und Bewertung verschiedener Phänomene des „Globalen Wandels“. Sie bildet damit eine wesentliche Grundlage für die qualitative und quantitative Bewertung der aktuellen Themen des „Globalen Wandels“.

Die Fernerkundung bietet aber auch Ansatzpunkte für viele neue Fragen und Aufgaben, die sich aus den Problemkreisen des „Globalen Wandels“ und deren Lösung ergeben, beispielsweise zu den globalen Wasserbilanzen und virtuellen Wassertransfers, der objektiven Abschätzung oberirdisch gespeicherter Kohlenstoffe im Kontext des Emissionshandels, der Frage von Nutzungsentgelten und globaler *Governance*. Sie ist neben den globalen Messnetzen die tragende Säule eines globalen Umweltmonitorings. Über die spektralen Eigenschaften lassen sich quantitative und qualitative Merkmale vieler Systemparameter erschließen. Die Fernerkundungsdaten vermitteln darüber hinaus den räumlichen Kontext. Aus diesen Lagebeziehungen ergeben sich weitere Folgerungen auf Kausalitäten, Betroffenheiten und Belastungen. Die Fernerkundung kann in diesem Sinn als globales, komplex integrierendes Monitoringsystem verstanden werden, das eine kontinuierliche, flächendeckende und objektive Beobachtung irdischer Zustandsgrößen ermöglicht.

Im Lauf der letzten 50 Jahre sind einzigartige Zeitreihen entstanden. Bildsequenzen dokumentieren den Verlauf der zum Teil dramatischen Änderungen. Die Fernerkundung ist somit ein Instrument der Zeitreihenanalysen geworden, zumal immer mehr Parameter in einem operationalisierten Modus angeboten werden. Es ist eine wesentliche Aufgabe, diesen Datenbestand bzw. die daraus generierten Bildsequenzen als Kulturgut zu begreifen, das die retrospektive Beurteilung verschiedener Perspektiven ermöglicht. Über den Dokumentationscharakter hinaus wird damit die Grundlage gelegt, um mit Hilfe zusätzlicher sozioökonomischer Informationen – eine schrittweise globale *Governance* vorausgesetzt – Fragen der Ursachen, Beteiligungen und Belastungen zu klären und letztlich auch eine Art „Beweissicherung“ zu erbringen. Andererseits können die Daten Ausgangspunkt für Renaturierungsmaßnahmen sein. Dies setzt einen freien Zugang zu den Daten und die Freigabe der Metadaten voraus.

Die Fernerkundung ist langfristig zur Erfassung von Prozessen und Auswirkungen des globalen Wandels unverzichtbar. Folgerichtig müssen die gemeinsamen Anstrengungen darauf abzielen, langfristig ein globales, international abgestimmtes satellitengestütztes Monitoringsystem zur Beobachtung des globalen Wandels zu etablieren und eine standardisierte Ableitung von Geovariablen in räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmten Skalen von der globalen über die regionale bis hin zur lokalen Ebene zu ermöglichen.

6. Fazit

Die Fernerkundung ist das derzeit wichtigste globale Überwachungssystem, das kontinuierlich und flächendeckend eine objektive Beobachtung zentraler Zustandsgrößen der Erde bilanzieren hilft. Insbesondere die Themenkreise, die im Rahmen des globalen Wandels eine Rolle spielen, sind mit diesen Systemen zu quantifizieren und damit auch zu objektivieren. Die Fernerkundung ist unverzichtbar zur Erfassung der zugrundeliegenden Prozesse und der Auswirkungen des globalen Wandels auf die Erdoberfläche. Vor allem

die mittlerweile möglichen Zeitreihen der verschiedenen Erdaufnahmesysteme lassen die Transformationen analysieren, wobei neben qualitativen Aspekten quantitative Analysen möglich sind, die dann wiederum für weiterführende Modellanalysen und Modellrechnungen zur Verfügung stehen.

Es wird in Zukunft notwendig sein, verstärkt standardisierte Produkte der verschiedenen Zustandsgrößen flächenhaft und automatisch zur Verfügung zu stellen, die in räumlich und zeitlich aufeinander abgestimmten Sequenzen der Wissenschaft, aber auch den *Stakeholdern* sowie den politischen Entscheidungsträgern und NGOs zur Verfügung gestellt werden. Dazu müssen die globalen Datensätze im Sinne einer *Up-and-down*-Skalierung mit regionalen und lokalen Befunden und Erkenntnissen zusammengeführt werden. Die unterschiedliche Verknüpfung von verschiedenen Datentypen, u. a. von Messstationen, aber auch von großräumigen überregionalen Systemen mit den globalen Befunden stellt eine besondere Herausforderung für die *Global-Change*-Forschung dar. Die Skalenbezogenheit wird ergänzt durch die spezifische historische Tiefe, die für viele Facetten des globalen Wandels zu erkennen und für die Bewertung dieses Wandels unabdingbare Voraussetzung ist.

Die Fernerkundung ist das derzeit überzeugendste Analysewerkzeug für die Bewertung des globalen Wandels. Die Perspektive von weiteren Sensoren und Aufnahmesystemen mit immer neuen Möglichkeiten der spektralen Auflösung, der zeitlichen sowie der räumlichen Auflösung, stellt sogar eine Verbesserung der Bewertung in naher Zukunft in Aussicht.

Literatur

- BIELLO, D.: Ocean impact map reveals human reach global. *Scient. American* 15 Febr. (2008)
- BOYSEN, M., and SCHELLNHUBER, J.: *Heaven and Earth*. From Pergamon to Potsdam. Potsdam: PIK 2007
- CONG, X., BALSS, U., EINEDER, M., and FRITZ, T.: Imaging geodesy: Centimeter-level ranging accuracy with TerraSAR-X: An update. *IEEE. Geoscience and Remote Sensing Lett.* 9/5, 948–952 (2012)
- DECH, S., GLASER, R., und MEISSNER, R.: *Globaler Wandel: Die Erde aus dem All*. München: Frederking & Thaler 2008
- EINEDER, M., BAMLER, R., CONG, X. Y., GERNHARDT, S., FRITZ, T., ZHU, X. X., BALSS, U., BREIT, H., ADAM, N., und FLORICIOIU, D.: Globale Kartierung und lokale Deformationsmessungen mit den Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X. *ZfV. Z. Geodäsie Geoinformation Landmanagement* 1/2013, 75–84 (2013)
- EISFELDER, C., KÜNZER, C., and DECH, S.: Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *Int. J. Remote Sensing* 33/9, 2937–2984 (2012)
- ESCH, T., TAUBENBÖCK, H., ROTH, A., HELDENS, W., FELBIER, A., THIEL, M., SCHMIDT, M., MÜLLER, A., and DECH, S.: TanDEM-X mission – new perspectives for the inventory and monitoring of global settlement patterns. *J. Applied Remote Sensing* 6, 1–21 (2012)
- FLITNER, M., SOYEZ, D., und VENZKE, J.-F.: Konflikte um Waldnutzung – Die borealen Waldländer. In: GEBHARDT, H., GLASER, R., RADTKE U., und REUBER, P. (Hrsg.): *Geographie. Physische Geographie und Humangeographie*. S. 993–1003. Heidelberg: Spektrum/Elsevier 2011
- GEBHARDT, H., MEUSBURGER, P., und WASTL-WALTER, D.: *Humangeographie*. Heidelberg: Spektrum/Elsevier 2001
- GRUBER, A., WESSEL, B., HUBER, M., and ROTH, A.: Operational TanDEM-X DEM calibration and first validation results. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing* 73, 39–49 (2012)
- KÜNZER, C., and RENAUD, F.: Climate and environmental change in river deltas globally: Expected impacts, resilience, and adaptation. In: RENAUD, F. G., and KUENZER, C. (Eds.): *The Mekong Delta System: Interdisciplinary Analyses of a River Delta*. Springer Environmental Science and Engineering, DOI 10.1007/978–94–007–3962–8_2. Dordrecht: Springer Science+Business Media 2012
- LOYOLA, D., KOUKOULI, M. E., VALKS, P., BALIS, D. S., HAO, N., VAN ROOZENDAEL, M., SPURR, R. J. D., ZIMMER, W., KIEMLE, S., LEROT, C., and LAMBERT, J.-C.: The GOME-2 total column ozone product: Retrieval algorithm and ground-based validation. *J. Geophys. Res.* 116, D07302 (2011)

- MALTHUS, T. R.: *The Principle of Population. With a Summary View and Introduction by Professor Antony Flew.* Penguin Classics 1798 1st edition. 1830
- NEWTON, A., CARRUTHERS, T. J. B., and ICELY, J.: *The coastal syndromes and hotspots on the coast. Estuarine Coastal Shelf Science* 96, 39–47 (2012)
- ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN, F. S. III, LAMBIN, E. F., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H. J., NYKVIST, B., WIT, C. A. DE, HUGHES, T., VAN DER LEEUW, S., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P. K., COSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R. W., FABRY, V. J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P., and FOLEY, J. A.: *A safe operating space for humanity. Nature* 461, 471–475 (2009)
- STEFFEN, W., SANDERSON, A., TYSON, P. D., JÄGER, J., MATSON, P. A., MOORE, B. III, OLDFIELD, F., RICH-ARDSON, K., SCHELLNHUBER, H. J., TURNER, B. L., and WASSON, R. J.: *Global Change and the Earth System. A Planet under Pressure. IGBP-Series.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004
- TAUBENBÖCK, H., ESCH, T., FELBIER, A., WIESNER, M., ROTH, A., and DECH, S.: *Monitoring urbanization in mega cities from space. Remote Sensing of Environment* 117, 162–176 (2012)
- TETZLAFF, R. (Ed.): *Weltkulturen unter Globalisierungsdruck.* Bonn: Dietz 2000
- TURNER, B. L., KASPERSON, R. E., MATSON, P. A., MCCARTHY, J. J., CORELL, R. W., CHRISTENSEN, L., ECKLEY, N., KASPERSON, J. X., LUERS, A., MARTELLO, M. L., POLSKY, C., PULSIPHER, A., and SCHILLER, A.: *A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100, 8074–8079 (2003)
- UNEP – United Nations Environment Programme: *GEO 5. Global Environment Outlook. Environment for the Future We Want.* Malta: Progress Press Ltd. 2012
- US Global Change Research Information Office 2007
- WALKER, B., CARPENTER, S., ANDERIES, J., ABEL, N., CUMMING, G., JANSSEN, M., LABEL, L., NORBERG, J., PETERSON, G. D., and PRITCHARD, R.: *Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. Conservation Ecology* 6, online; UNEP: Geneva: DEWA/ Grid 2012
- WATTS, M., and BOHLE, H. G.: *The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine. Progress in Human Geography* 17, 43–67 (1993)
- WBGU: *Welt im Wandel – Grundstruktur globaler Mensch-Umwelt-Beziehungen. Hauptgutachten 1993*
- WISNER, B., BLAIKIE, P., CANNON, T., and DAVIS, I.: *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters.* London: Routledge 2004
- ZIEGLER, D.: *Die industrielle Revolution, 2. Aufl. Darmstadt: WBG 2009*

Prof. Dr. Rüdiger GLASER
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Physische Geographie
Werthmannstraße 4
79085 Freiburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 761 2033527
E-Mail: ruediger.glaser@geographie.uni-freiburg.de

Prof. Dr. Stefan DECH
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Institut für Geographie und Geologie
Oswald-Külpe-Weg 86
97074 Würzburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 8153 281389
Fax: +49 8153 283444
E-Mail: Stefan.Dech@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)
Oberpfaffenhofen
82234 Weßling

Belastungsgrenzen der Erde – Leitplanken für die Menschheit

Hans Joachim SCHELLNHUBER ML (Potsdam)

Mit 6 Abbildungen



Zusammenfassung

Aufgrund günstiger und einzigartig stabiler Umweltbedingungen konnte sich die menschliche Zivilisation im Holozän – innerhalb der letzten 12 000 Jahre – zu einem weltumspannenden Mega-System („Anthroposphäre“) entwickeln. Allerdings beeinflusst der dafür erforderliche agrarische und industrielle Stoffwechsel (insbesondere Energie- und Materialströme) inzwischen das natürliche Erdsystem („Ökosphäre“) auf massive Weise und könnte sich durch die Gefährdung der „Holozän-Betriebsweise des Planeten“ schließlich selbst konterkarieren. Der anthropogene Klimawandel ist nur ein – wenngleich spektakulärer – Aspekt dieses Dilemmas.

Doch welche Exkursionen der Ökosphäre weg vom vorindustriellen Referenzzustand sind verträglich mit der Bewahrung und nachhaltigen Fortentwicklung unserer Zivilisation? Lassen sich die Grenzen, die den „grünen Bereich“ im Ökosphärenbetrieb markieren, bestimmen, und wie weit sind wir noch von ihnen entfernt? Gibt es insbesondere ein Zurück, falls eine der roten Linien schon überschritten sein sollte?

Mein Beitrag wird auf diese bedeutsamen Fragen Antworten geben, dort wo dies überhaupt schon möglich ist. Grundlage dafür ist unter anderem eine globale Systemanalyse (ROCKSTRÖM et al. 2009), welche zeigt, dass neben dem Klimawandel die zivilisatorische Störung der Stickstoff- und Phosphorzyklen sowie der weltweiten Biodiversität bereits überkritische Dimensionen angenommen hat. Weiter vertieft werden soll dieser Ansatz durch Betrachtung der sogenannten natürlichen Kippelemente (LENTON et al. 2008), also großskaliger Subsysteme der Ökosphäre (z. B. Eisschilde oder Monsunregime), welche durch menschliche Intervention in einen neuen Zustand übergeführt werden könnten. Eine noch völlig offene Forschungsfrage ist, wie solche Kippelemente miteinander wechselwirken und ob sie gemeinsam imstande wären, hochgradig nichtlineare planetarische Dynamiken auszulösen.

Abstract

Due to favorable and stable environmental conditions during the Holocene (roughly the last 12,000 years), human civilization was able to develop into a world-wide mega-system (“anthroposphere”). However, the necessary agro-industrial metabolism (essentially fluxes of energy and materials) already strongly interferes with the natural Earth System (“ecosphere”) and may thus act against itself through jeopardizing the “Holocene mode of planetary operation”. Anthropogenic climate change is just one (spectacular) aspect of that dilemma. So which ecosphere excursions away from the Holocene reference state are commensurable with the preservation and sustainable development of our civilization? Is it possible to delineate the boundaries that define the “safe space” for ecosphere operation; and if yes, how far are we still away from those boundaries? And, finally, is there a way back in case we have already transgressed one of the red lines?

My lecture will provide answers to these crucial questions as far as the current state of Earth System science allows. Important insights will be drawn, inter alia, from a recent global systems analysis (ROCKSTRÖM et al. 2009), which maintains that not only climate change is spinning out of control, but also the anthropogenic perturbation of worldwide biodiversity and of the nitrogen-phosphorous cycle. I will elaborate further on natural tipping elements (LENTON et al. 2008), i. e., large-scale ecosphere sub-systems (such as ice sheets and monsoon regimes), which might be pushed into new qualitative states by human intervention.

The talk will conclude by touching upon eminent, yet still open research questions: How do tipping elements in the Earth System interact, and might they be able to conspire for bringing about highly nonlinear planetary responses to anthropogenic forcing?

1. Die Entstehung der Moderne und die Destabilisierung der Natur

Die Entwicklungsgeschichte der Menschheit ist geprägt durch stetig wachsende metabolische Komplexität, technischen Fortschritt und ökonomische Transformation. Auf diesem Weg schiebt die Zivilisation jedoch die natürliche Umwelt der Erde immer näher an und über ihre Belastungsgrenzen. Wie konnte es dazu kommen?

In den grob zwei Millionen Jahren vor der Neolithischen Revolution war die Welt von enormen Klimaschwankungen geprägt. Seit der letzten Eiszeit herrscht jedoch eine erstaunlich stabile globale Mitteltemperatur vor, die letztlich die Basis für die Sesshaftigkeit der Menschheit bot. Bereits in dieser frühen Phase begann man mit der intensivierten Nutzung des verfügbaren Bodens, was eine Verringerung der zur Versorgung nötigen Pro-Kopf-Fläche zur Folge hatte.

Später schuf die Industrielle Revolution (Abb. 1) mit der Nutzung der Steinkohle nicht nur ein neues energetisches Fundament für die Gesellschaft, sondern setzte eine Kette von Fortschritten in Gang. Der Ursprung der Kohleförderung liegt in England, da dort der Rohstoff Holz, bedingt durch den Schiffbau, zur Neige ging und ersetzt werden musste. Erste primitive Kohlegruben wurden eröffnet, die allerdings ständigen Wassereinbrüchen ausgesetzt waren. Um das austretende Wasser in den Schächten effizient zu beseitigen, wurden erstmals Dampfmaschinen eingesetzt. James WATT gelang es in dieser Zeit, die Effizienz dieser Maschinen soweit zu steigern (auf 1–2%), dass sie auch in anderen Industriebereichen zu gebrauchen waren. Die Koppelung mit einer Textilmaschine in Manchester im Jahre 1785 war somit die Geburt der modernen Welt (WBGU 2011).

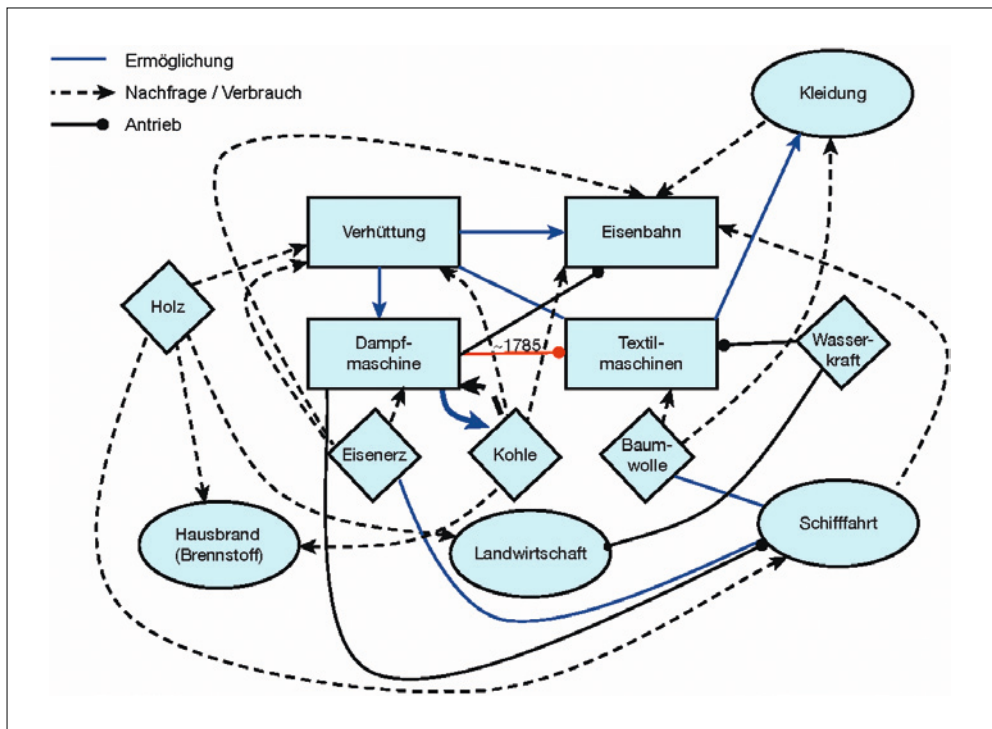


Abb. 1 Kausalgeflecht der Industriellen Revolution. Quelle: WBGU 2011

Eine Folge der so in Gang gebrachten Entwicklung war der rasante Anstieg der Weltbevölkerung, die seit der Neolithischen Revolution von etwa einer Million Menschen auf mehrere Milliarden in der heutigen Industriegesellschaft zunahm und im Jahre 2050 bei etwa neun Milliarden liegen wird (WBGU 2011).

Bereits im Zeitalter der Industriellen Revolution wurde die Versorgung der wachsenden Weltbevölkerung von Moralphilosophen wie Thomas Robert MALTHUS als Problem erkannt. Dieser prognostizierte eine schnell einsetzende Nahrungsmittelknappheit, unterschätzte dabei allerdings die möglichen Produktivitätssteigerungsraten bei den verfügbaren Ressourcen. In der Realität verliefen Bevölkerungs- und Nahrungsmittelkurve im Gleichschritt.

Der Zusammenhang zwischen Jahresenergiebedarf pro Kopf und der Fläche, die gebraucht wird, um diesen Energiebedarf zu decken, zeichnet gewissermaßen eine „Lebenslinie der Menschheit“ (Abb. 2). Es lässt sich zeigen, dass der Flächenbedarf in der Evolution der technischen Zivilisation drastisch reduziert werden konnte (WBGU 2011 nach SIEFERLE et al. 2006).

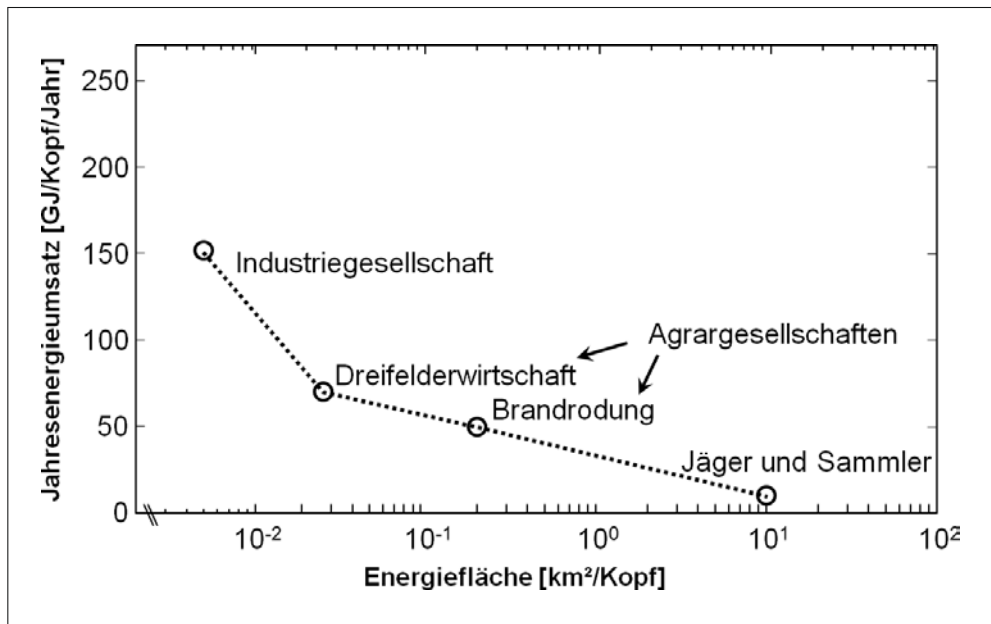


Abb. 2 Entwicklung der Energieflächenproduktivität Teil 1. Quelle: WBGU 2011, in Anlehnung an SIEFERLE et al. 2006

Eine Folge der „Abschaffung der Fläche“ zugunsten von Punktquellen für Energie (z. B. Ölquellen) ist der Klimawandel. Bereits 1896 konnte Svante ARRHENIUS – ganz ohne Supercomputer – ein logarithmisches Gesetz für den Zusammenhang zwischen globaler Erwärmung und CO₂-Konzentration in der Atmosphäre herleiten. Moderne Messungen belegen, dass die mittlere Oberflächentemperatur der Erde in den letzten vier Jahrzehnten auf Grund der anthropogenen Treibhausgasemissionen bei einem näherungsweise linearen Trend um etwa 0,5 °C angestiegen ist. Wenn man bei der Entwicklung in Jahresschritten die kurzfris-

tige, natürliche Variabilität aufgrund von Faktoren wie Vulkanausbrüchen und El-Niño-Oszillationen herausrechnet, dann wird auch die gelegentlich aufgestellte Behauptung, die globale Erwärmung stehe seit 1998 still, schnell gegenstandslos (FOSTER und RAHMSTORF 2011).

Als Beispiele für die bereits sichtbaren Auswirkungen des Klimawandels seien genannt:

- Rückgang der Arktischen Meereisfläche.
Die minimale Ausdehnung des Meereises, die meist im September erreicht wird, lag im Jahr 2012 um 49% unter dem Durchschnitt des Zeitraums 1979–2000. Dies bedeutet nach einigen Abschätzungen die geringste Ausdehnung seit mindestens 1500 Jahren (*National Snow and Ice Data Center*).
- Hitzewellen.
Die innerhalb der letzten zehn Jahre außergewöhnlich häufig aufgetretenen Hitzewellen hatten große gesellschaftliche Folgen (RAHMSTORF und COUMOU 2011). Da sich diese Hitzewellen mit statistischen Verschiebungen nicht erklären lassen, müssen tiefer liegende Vorgänge in der Atmosphäre verantwortlich sein. Eine mögliche Erklärung liefert das Konzept der Wechselwirkung planetarischer Wellen, das von der Existenz stehender (*stationary*) und laufender (*travelling*) Wellen auf der Erde ausgeht. Wenn stehende Wellen (gekoppelt an Kontinentalränder oder Gebirgszüge) laufende Wellen durch Resonanz „einfangen“, können sich die beiden Gebilde gegenseitig verstärken. Möglicherweise wird durch die globale Erwärmung die Neigung zu genau solchen Resonanzen erhöht (PETHOUKOV et al. 2013).
- Dürren.
MALTHUS' Thesen erscheinen vor dem Hintergrund des Klimawandels wieder aktuell, denn die Ernährung der stetig wachsenden Weltbevölkerung wird durch die Folgen des Klimawandels gefährdet. Metastudien zeigen (KNOX et al. 2012), dass die Erderwärmung mit großer Wahrscheinlichkeit die landwirtschaftliche Produktion behindern wird, wie beispielsweise während der extremen Dürre im Jahr 2012 in den USA.
- Emissionsentwicklung.
Die Freisetzung von Treibhausgasen wie Kohlendioxid ist die Ursache für die globale Erwärmung; ihre Regulierung ist daher die Grundlage erfolgreicher Klimapolitik. Zwei Schlüsselszenarien, wie sich die CO₂-Emissionen aus fossilen Ressourcen entwickeln könnten, lassen sich hierbei durchspielen: Im einen Fall gibt es weiterhin keine konzentrierte Klimapolitik, im anderen verfolgt die Weltgemeinschaft eine entschlossene Klimaschutzstrategie.

Wie in Abb. 3 veranschaulicht, belaufen sich die Emissionen zum heutigen Zeitpunkt auf etwa 32 Milliarden Tonnen CO₂ pro Jahr, während sie im Jahr 1800 noch fast null betragen.

Im pessimistischsten Szenario (rote Linie) wird ein Konzentrationsverlauf angenommen, bei dem die Emissionen auf über 100 Gt im Jahr 2100 anwachsen. Da selbst bis zum Jahr 2250 erst etwa 1% des verfügbaren fossilen Brennstoffs extrahiert sein werden, liegt dieser fatal hohe Wert durchaus im Bereich des Möglichen. In diesem Szenario wird nach Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung die Erdtemperatur im Mittel um 8 °C gegenüber dem durchschnittlichen Niveau während der Warmzeit, in der wir uns geologisch gesehen heute befinden, zunehmen. Ab dem Jahr 2200 werden in diesem Szenario die Emissionen im Übrigen stark abnehmen, weil angenommen wird, dass sich die Kosten der Förderung nicht mehr rechtfertigen lassen (MEINSHAUSEN et al. 2011).

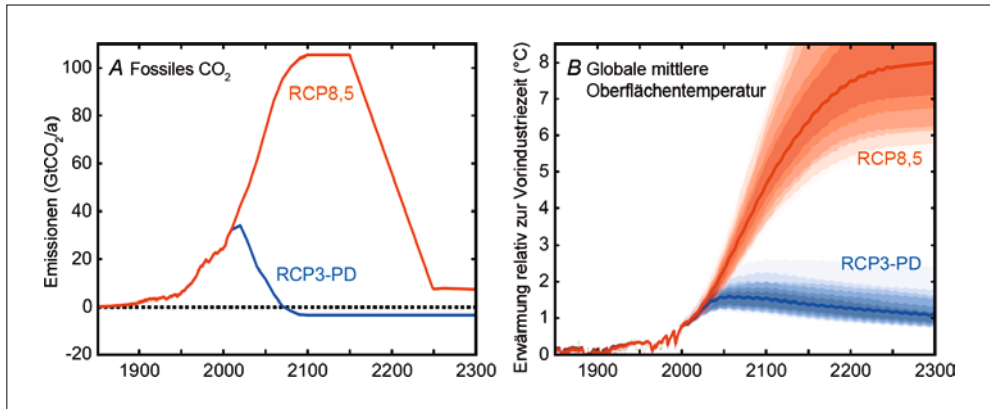


Abb. 3 Die aktuelle Zukunft – am Scheideweg. Verlauf der Emissionen 1850 bis 2300: Angaben für (A) fossiles CO₂, (B) globale mittlere Oberflächentemperatur. Quelle: MEINSHAUSEN et al. 2011, verändert

Im optimistischen Szenario (blaue Linie) sinken die Emissionen ab einem Scheitelpunkt etwa im Jahr 2020 bis zum Jahr 2070 auf null und anschließend sogar unter die Nulllinie. Letzteres wären „negative Emissionen“, d. h., die Atmosphäre würde aktiv von CO₂ „gereinigt“. Nur in diesem dramatischen Dekarbonisierungsszenario kann die 2 °C-Leitplanke respektiert werden, welcher sich 194 Nationen im Dezember 2010 beim Klimagipfel in Cancún verschrieben haben. Das optimistische Szenario ist damit kaum weniger extrem als das pessimistische Szenario, weil es nicht nur ein Emissionsreduktionsszenario darstellt, sondern ein Emissionsinversionsszenario – also eine Schubumkehr (MEINSHAUSEN et al. 2011).

2. Belastungsgrenzen der Erde

In welchen Bereichen bewegt sich die Menschheit nun nahe bzw. jenseits der Belastungsgrenzen der Erde? Hier sind neben dem Klima und der Biodiversität auch der Phosphor- und der Stickstoffzyklus, die von entscheidender Bedeutung für die Landwirtschaft sind, zu nennen. In den Bereichen Biodiversität, Klima und Stickstoffzyklus sind die Leitplanke bereits durchbrochen, beim Phosphorzyklus steht eine Grenzüberschreitung kurz bevor (ROCKSTRÖM et al. 2009).

Als negatives Beispiel für den Umgang mit geringer werdenden Phosphatressourcen ist die Insel Nauru zu nennen. Diese ist ein Inselstaat im pazifischen Ozean und besteht aus der gleichnamigen Koralleninsel mit ca. 10 000 Einwohnern. Die Phosphatbestände waren jahrelang eine lukrative Einnahmequelle. Mit zurückgehenden Beständen schwanden jedoch allmählich die Einnahmen, die zudem weder von öffentlicher noch von privater Seite zukunftsicher angelegt worden waren. Eine rasante Verarmung des Staates war die Folge. Was heute vom früheren Reichtum – Kinder wurden auf die Namen Rolex und Ferrari getauft – übrig bleibt, ist eine der höchsten Fettleibigkeits- und Diabetesraten der Welt! Das Schicksal der Insel liefert also einen Vorgeschmack dafür, was bei einer nicht-nachhaltigen Ressourcennutzung der gesamten Erde droht.

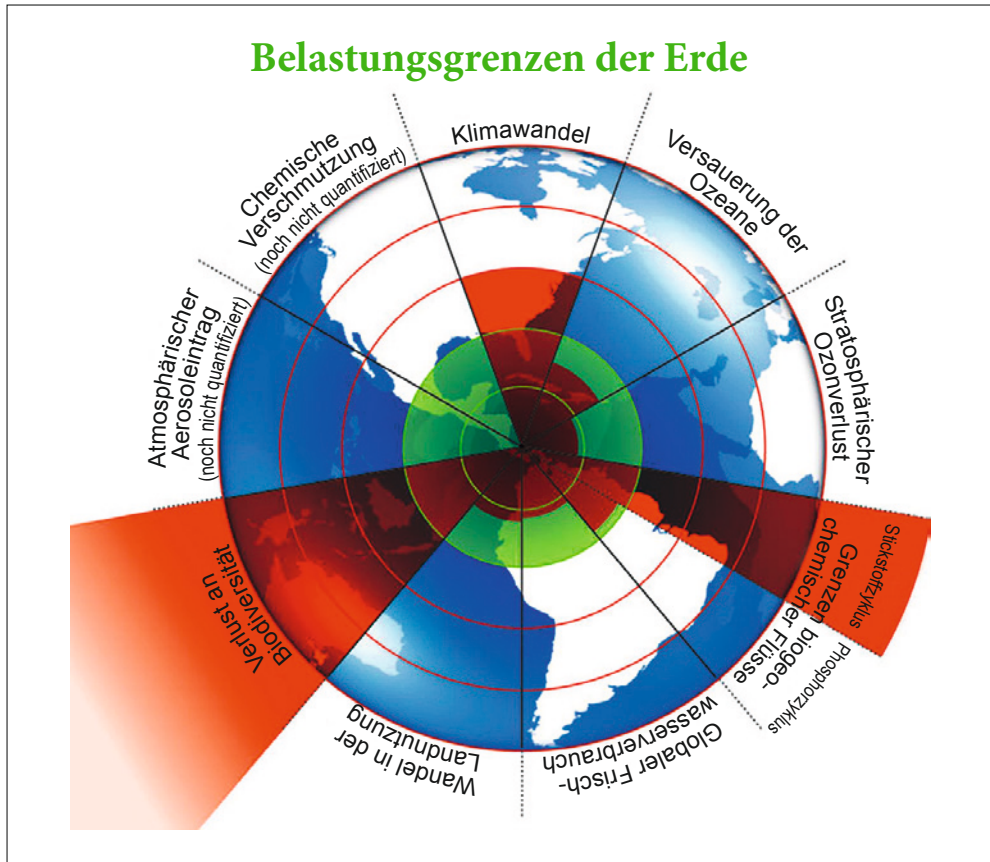


Abb. 4 Belastungsgrenzen der Erde. Quelle: ROCKSTRÖM et al. 2009, verändert

Das Überschreiten der Belastungsgrenzen (Abb. 4) des Planeten kann gleichgesetzt werden mit dem Verlassen des „grünen“ Belastungsbereichs für eine Zivilisation, die trotz aller technischen Fortschritte auf funktionsfähige Umweltgüter angewiesen bleibt.

3. Kippelemente im Erdsystem

Die prominenteste aller Demarkationslinien ist in diesem Zusammenhang zweifellos die 2°C-Leitplanke. Doch wie kam es zu einer Einigung auf diese Marke? Ein wichtiger systemischer Grund, warum das 2°C-Limit ein einschneidender politischer Referenzpunkt sein dürfte, hängt mit den sogenannten Kippelementen zusammen. Diese sind wichtige Subsysteme des Planeten, deren Veränderung, wie das Abschmelzen der großen Eisschilde, die Transformation des Amazonasregenwaldes oder eine Zirkulationsänderung des indischen Sommermonsuns, zu Wechselwirkungen mit anderen Systemen führen und die gesamte Ökosphäre aus dem Gleichgewicht bringen könnte (LENTON et al. 2008).

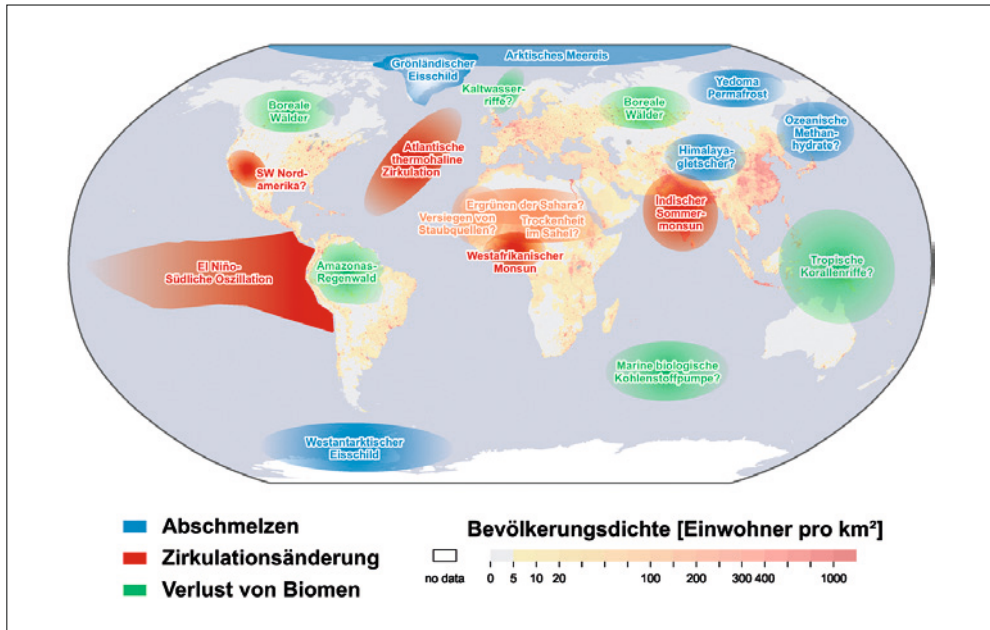


Abb. 5 Die gegenwärtigen Risikozonen: Kippelemente im Erdsystem. Quelle: PIK, nach LENTON et al. 2008

Die möglichen Wechselwirkungen sind allerdings noch weitgehend unerforscht. Für die Destabilisierung einzelner Kippelemente könnte unter gewissen Umständen ein Kaskadeneffekt wirksam sein, bei dem ein kleines Element einen Dominoeffekt auslöst und andere Systeme mit sich reißt.

Solch ein Kaskadeneffekt wird vielleicht die Zukunft des Antarktiseises beeinflussen: Dabei brechen – verursacht durch eine Schwächung des nur wenige Meter dicken Meereseises und die damit einhergehende Umlenkung warmer Wassermassen durch den Wind – zunächst die vorgelagerten, schwimmenden Eisschelfe von mehreren hundert Metern Dicke ab, und der auf festem Grund lagernde Eisschild wird für Erosion angreifbar bzw. aufgrund seiner speziellen Geometrie instabil. Ein daraus resultierendes Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes würde einen Meeresspiegelanstieg von mehreren Metern zur Folge haben. Auch der Grönländische Eisschild kann bereits ab einer globalen Erwärmung von 1,6°C irreversibel zu schmelzen beginnen, allerdings in einem Jahrtausende andauernden Prozess (ROBINSON et al. 2012).

Eine Temperaturerhöhung, welche die 2°C-Leitplanke durchbricht, birgt das Potenzial, mächtige Komponenten des Erdklimasystems an ihren jeweiligen Kippunkt zu tragen. In der Wissenschaft liegen starke Hinweise darauf vor, dass unterhalb der 2°C-Marke die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten solcher Kippunkte deutlich geringer ist.

Eine besonders drastische Auswirkung der Erwärmung auf ein zentrales Ökosystem untersuchte eine erst kürzlich erschienene Studie in *Nature Climate Change* (FRIELER et al. 2012), welche international auf große Aufmerksamkeit gestoßen ist. Die Studie stellt die weltweit prognostizierte Intensität und Häufigkeit der Korallenbleiche in Abhängigkeit von der globalen mittleren Temperaturveränderung dar und zeigt, dass ein Großteil der Korallenriffe bereits bei einer Erwärmung von 1,5°C verloren gehen könnte.

Ein Blick in die Klimaarchive der Erde, wie die Daten aus dem Vostok-Eisbohrkern der Antarktis, der über 400 000 Jahre zurückreicht, enthüllt ein klares Bild der von Nichtlinearität dominierten Klimageschichte. Wir wissen heute, dass die natürlichen Schwankungen der Orbitalparameter nicht nur die eingestrahlte Sonnenenergie auf der Erde bestimmten, sondern innerhalb des hochkomplexen Systems „Klima“ weitreichende Folgen in Form von wiederkehrenden Warm- und Kaltzeiten hatten. Die Schwankungen des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre, die Ausdehnung der großen Eisschilde und somit der Meeresspiegel können dank der von Dr. Andrey GANOPOLSKI am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung durchgeführten ersten transienten Simulation des letzten Eiszeitzyklus mit interaktiven Eisschild- und Kohlenstoffkreislaufmodellen nachvollzogen werden (GANOPOLSKI et al. 2012).

Dies verdeutlicht die nichtlinearen Eigenschaften der globalen Umwelt recht eindrucksvoll und veranschaulicht somit die potenziellen Folgen einer menschengemachten Veränderung eines planetarischen Leitparameters, nämlich der atmosphärischen Konzentration an Treibhausgasen.

4. Über die fossile Moderne hinaus

Gerade die Untersuchung der Kippelemente im Erdsystem zeigt, dass der traditionelle Entwicklungsweg der Menschheit nicht weiter beschritten werden kann. Es ist Zeit für eine neue zivilisatorische Revolution. Bei der bisher praktizierten Energiegewinnung stehen Punktquellen im Mittelpunkt. Diese Praxis, mit ihren zahlreichen negativen Folgen, wird sich in Zukunft nicht weiter aufrechterhalten lassen. Der historisch neue Weg besteht in einem großen Übergang zur klimaverträglichen und ressourceneffizienten Weltwirtschaft, in der die Grenzen des Erdsystems respektiert werden.

Im Wesentlichen sind dafür zwei Szenarien denkbar, die zügig realisiert werden müssten. Das erste Szenario beschreibt eine Nachhaltigkeitskultur, die auf Flächenquellen als

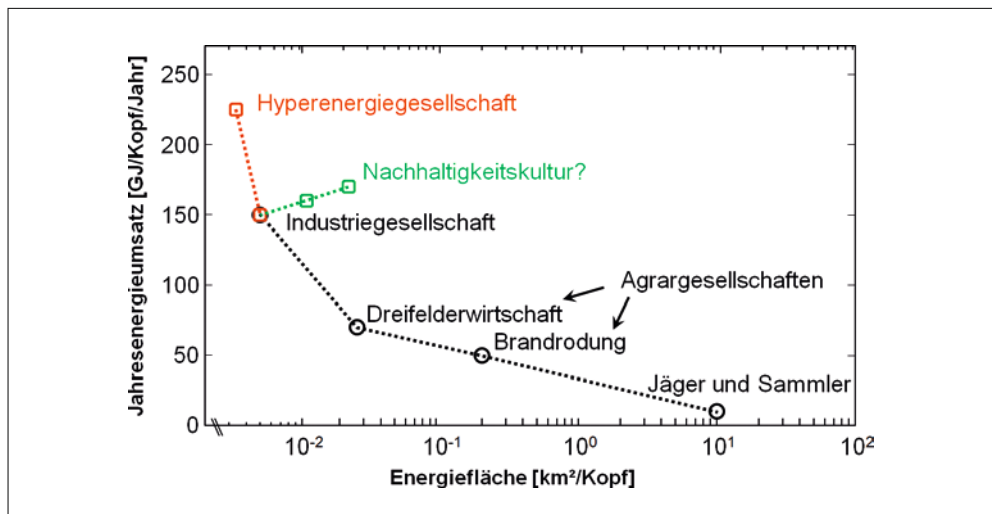


Abb. 6 Entwicklung der Energieflächenproduktivität Teil 2. Quelle: WBGU 2011 in Anlehnung an SIEFERLE et al. 2006

Lieferant nachhaltiger Energien wie Windenergie, Solarenergie und Geothermie baut. Das zweite Szenario würde über Technologien wie die Kernfusion den Weg in die „Hyperenergiegesellschaft“ ebnen können.

Auf ihrem entwicklungsgeschichtlichen Weg muss die Menschheit in jedem Falle eine gewaltige Transformation absolvieren, um die negativen Folgen für das Klima, die Biodiversität, die Welternährung und -gesundheit sowie die geochemischen Kreisläufe zu begrenzen.

Literatur

- CINGANO, F., and SCHIVARDI, F.: Identifying the sources of local productivity growth. *J. European Economic Association* 2/4, 720–742 (2004)
- FOSTER, G., and RAHMSTORF, S.: Global temperature evolution 1979–2010. *Environ. Res. Lett.* 6, 044022 (2011)
- FRIELER, K., MEINSHAUSEN, M., GOLLY, A., MENGEL, M., LEBEK, K., DONNER, S. D., and HOEGH-GULDBERG, O.: Limiting global warming to 2°C is unlikely to save most coral reefs. *Nature Climate Change* [DOI: 10.1038/NCLIMATE1674] (Advance Online Publication) (2012)
- GANOPOLSKI, A., and CALOV, R.: Simulation of glacial cycles with an Earth system model. In: BERGER, A., et al. (Eds.): *Climate Change. Part 2*, 49–55, doi: 10.1007/978-3-7091-0973-1_3. Wien: Springer 2012
- KNOX, J., HESS, T., DACCACHE, A., and WHEELER, T.: Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environ. Res. Lett.* 7, 034032 (2012)
- LENTON, T. M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J. W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., and SCHELLNHUBER, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 1786–1793 (2008)
- MALTHUS, T. R.: *Essay on the Principle of Population*. London: Johnson 1798
- MEINSHAUSEN, M., SMITH, S. J., CALVIN, K., DANIEL, J. S., KAINUMA, M. L. T., LAMARQUE, J.-F., MATSUMOTO, K., MONTZKA, S. A., RAPER, S. C. B., RIAHI, K., THOMSON, A., VELDELS, G. J. M., and VAN VUURENET, D. P. P.: The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109, 213–241 (2011)
- National Snow and Ice Data Center*: uside.org/arcticseaienews (2013)
- PETOUKHOV, V., RAHMSTORF, S., PETRI, S., and SCHELLNHUBER, H. J.: Quasi-resonant amplification of planetary waves and recent Northern Hemisphere weather extremes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 110, 5336 (2013)
- RAHMSTORF, S., and COUMOU, D.: Increase of extreme events in a warming world. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 5pp. doi:10.1073/pnas.1101766108 (2011)
- ROBINSON, A., CALOV, R., and GANOPOLSKI, A.: Multistability and critical thresholds of the Greenland ice sheet. *Nature Climate Change* 2, 429–432 (2012)
- ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, A., CHAPIN, F. S., LAMBIN, E. F., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H. J., NYKVIST, B., DE WIT, C. A., HUGHES, T., VAN DER LEEUW, S., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P. K., COSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R. W., FABRY, V. J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P., and FOLEY, J. A.: A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009)
- SIEFERLE, R. P., KRAUSMANN, F., SCHANDL, H., und WINIWARTER, V.: *Das Ende der Fläche. Zum gesellschaftlichen Stoffwechsel der Industrialisierung*. Köln: Böhlau 2006
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: SCHELLNHUBER, H. J., MESSNER, D., LEGGEWIE, C., LEINFELDER, R., NAKICENOVIC, N., RAHMSTORF, S., SCHLACKE, S., SCHMID, J., und SCHUBERT, R.) (Eds.): *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Berlin 2011

Prof. Dr. Dr. h. c. Hans Joachim SCHELLNHUBER
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Telegraphenberg A31
14473 Potsdam
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 331 2882502
Fax: +49 331 2882600
E-Mail: director@pik-potsdam.de

Globaler Wandel der Biodiversität

Volker MOSBRUGGER ML (Frankfurt/Main)

Mit 6 Abbildungen



Zusammenfassung

Trotz großer politischer und medialer Aufmerksamkeit ist der Klimawandel keineswegs das größte Umweltproblem unserer Zeit. In den Auswirkungen umfassender und fataler ist der Verlust an „Biodiversität“, d. h. der Verlust an biologischer Vielfalt auf allen Hierarchieebenen, von den Molekülen und Genen über die Arten bis hin zu den biotischen Interaktionen und Ökosystemen. Den tatsächlichen Umfang dieses Biodiversitätsschwundes, der vor allem durch Landnutzungsänderungen und Klimawandel verursacht wird, kennen wir nicht, doch sind die verfügbaren Daten alarmierend: knapp 40% aller untersuchten Arten bzw. Taxa sind in irgendeiner Weise bedroht, die Aussterberaten liegen vermutlich 100–1000-fach höher als das normale „Hintergrundausterben“. Welche Konsequenzen der aktuelle Biodiversitätsverlust für das System Erde, für die Ökosystemdienstleistungen und damit für die menschliche Subsistenz haben wird, ist ebenfalls erst schemenhaft erkennbar. Tatsächlich fehlen wichtige wissenschaftliche Grundlagen, um Biodiversität über sogenannte „No-regret-Maßnahmen“ hinaus nachhaltig schützen und nutzen zu können.

Abstract

Despite the enormous interest in media and politics, climate change is not the only and most important environmental problem of our times. More serious and more fatal is the actual loss of biodiversity, i. e. the loss of diversity of life on all hierarchical levels, from molecules and genes to species, biotic interactions and ecosystems. The real extent of this biodiversity loss, caused primarily by land use change and climate warming, is unknown but the available data are alarming: almost 40% of all investigated species or taxa are endangered, the present-day extinction rate is estimated to be 100 to 1000-times higher than the regular background extinction. The consequences of the actual biodiversity loss for the Earth System, for ecosystem services and thus for human subsistence are hardly understood. In fact, we lack basic scientific knowledge to develop concepts for the sustainable conservation and use of biodiversity which go beyond so-called “no regret measures”.

Two of the greatest challenges humanity faces are halting the loss of biodiversity and combating climate change.

Stavros DIMAS (2008)
(EU-Commissioner for the Environment)

1. Einführung

Unter den globalen Veränderungsprozessen wird der Klimawandel allgemein als besonders bedrohlich eingeschätzt. Er ist entsprechend medial wie politisch ein dominantes Thema und wird etwa im Millennium-Projekt der Vereinten Nationen (UN) als erstes der „15 Global Challenges facing humanity“ (www.millennium-project.org) gelistet. Aus der Perspektive der Erdsystemwissenschaften erscheint diese Sicht zu einseitig und verkürzt.

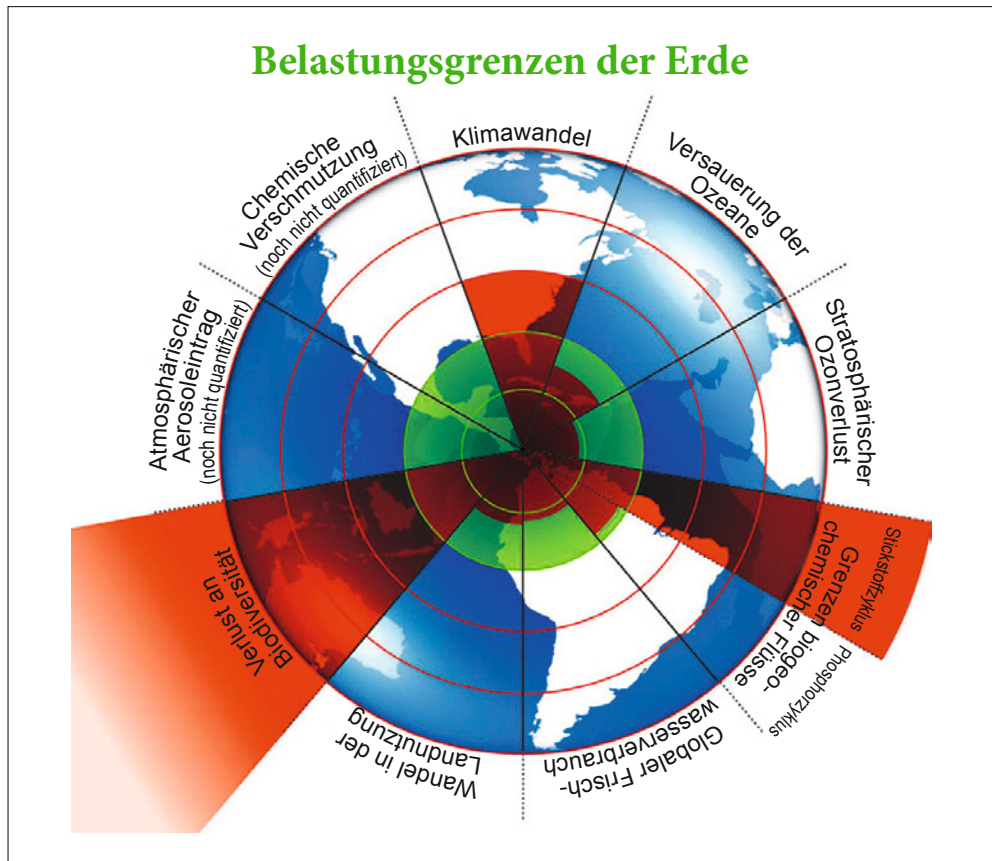


Abb. 1 Durch Eingriffe in das Erdsystem haben wir vermutlich bereits in mehreren Bereichen den „safe operating space for humanity“ (er entspricht dem inneren grünen Kreis) verlassen. Weitere Erläuterungen im Text. Aus ROCKSTRÖM et al. 2009, verändert.

Tatsächlich geht es um globale Veränderungen des gesamten Erdsystems, also der vernetzten und rückgekoppelten Kompartimente von Atmosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Geosphäre und Anthroposphäre, wobei der Klimawandel nur eine – und wie ich zeigen will – noch nicht einmal die größte Herausforderung darstellt. So untersuchen ROCKSTRÖM et al. (2009) neun Subsysteme des Erdsystems und kommen zum Schluss, dass bereits bei dreien der sogenannte „safe operating space for humanity“ überschritten wurde; dies betrifft *erstens* den Verlust an biologischer Vielfalt, *zweitens* den Klimawandel und *drittens* den globalen Stickstoffkreislauf (Abb. 1). Hier ist wichtig festzuhalten, dass das Erdsystem kein Gleichgewicht kennt, es ist vielmehr historisch geworden und verändert sich – mit und ohne Mitwirkung des Menschen – kontinuierlich. Es geht also nicht darum, dass der Mensch ein natürliches Gleichgewicht stört, vielmehr greift er in einen historisch-dynamischen Prozess so ein, dass er selbst zunehmend Schaden nimmt. Dabei ist nicht die Menschheit als Ganzes bedroht, sondern Menschen sind in ihrem Wohlbefinden, in ihren (Über-) Lebenschancen und ihren Entwicklungsmöglichkeiten gefährdet.

Der vorliegende, eher wie ein Essay konzipierte Beitrag gibt einen knappen Überblick über die Bedeutung der Biodiversität und des Biodiversitätsverlustes für die Erdsystemdynamik und die möglichen Konsequenzen für die Anthroposphäre. Dabei wird sich zeigen, dass unser Wissensstand bezogen auf den Biodiversitätsverlust unvergleichlich viel geringer ist als beim Klimawandel, Biodiversitätsverlust und Klimawandel jedoch eng gekoppelt sind und sich so das Risikopotential für Menschen deutlich erhöht.

2. Biodiversität – die bedrohte Unbekannte im Erdsystem

Unter Biodiversität verstehen wir die gesamte Vielfalt des Lebens auf allen Hierarchie- und Komplexitätsebenen. Biodiversität meint also die Vielfalt der Moleküle, der Gene, der Arten und taxonomischen Einheiten, der Lebensräume, der Wechselwirkungen zwischen Organismen usw. Biodiversität, in diesem umfassenden Sinne verstanden, ist auch heute noch weitgehend unbekannt! Am besten steht es noch um die Kenntnisse bezüglich der Artenvielfalt, doch sind auch hier die Wissenslücken weit größer als das tatsächliche Wissen. So kennen wir heute etwa 1,5–1,8 Millionen Tier- und Pflanzenarten; die Variationsbreite ergibt sich dabei aus der unterschiedlichen Einschätzung von Synonymen und Artabgrenzungen. Tatsächlich ist die biologische Artenvielfalt aber wesentlich höher, die Schätzungen reichen von 5 Millionen bis zu 100 Millionen Tier- und Pflanzenarten; die jüngste, eher konservative Schätzung geht von 9 Millionen Tier- und Pflanzenarten aus. Nimmt man diese Zahl als Grundlage, kennen wir tatsächlich nur zwischen 15 und 20% der tatsächlichen Artenvielfalt!

Für verschiedene Lebensräume, wie etwa für den Boden oder die Tiefsee, liegt dieser Wert sogar noch deutlich niedriger. Die Ozeane bedecken rund zwei Drittel der Erdoberfläche, der bei weitem größte Anteil davon (über 70%) gehört zur Tiefsee und erreicht Wassertiefen über rund 800 m. Das internationale Großvorhaben CEDAMAR (*Census of the Diversity of Abyssal Marine Life*) wurde zwischen 2000 und 2010 durch die Sloan-Foundation gefördert und stellte gewissermaßen eine „Volkszählung in den Tiefseebecken“ unserer Erde dar. Es zeigte sich, dass über 95% der bei den zahlreichen Tiefsee-Expeditionen geborgenen Tiefsee-Taxa neu und bisher unbekannt sind (P. MARTINEZ, Projektleiter CEDAMAR, mündliche Mitteilung).

Weltweit entdeckten und beschrieben Wissenschaftler 2009 rund 19 000 neue Arten (IISE 2012). Bleibt man bei diesem Tempo der Neuentdeckungen, und geht man von „nur“ 10 Millionen Arten aus (siehe oben), werden wir frühestens in Etwas über 500 Jahren einen annähernd vollständigen Überblick über die Artenvielfalt unseres Planeten erhalten – ganz zu schweigen von unseren Kenntnissen über die Biodiversität auf anderen Hierarchieebenen, wie etwa den Ebenen der Gene, der Wechselwirkungen oder der Lebensräume, denn hier sind unsere heutigen Kenntnisse noch wesentlich schlechter als bezüglich der Artenvielfalt. WHEELER et al. (2011) schlagen deshalb auch ein internationales Großprojekt vor, das innerhalb der nächsten 50 Jahre die globale Artenvielfalt mehr oder weniger vollständig erfasst.

Obgleich weitgehend unbekannt, ist diese biologische Vielfalt stark bedroht. Dies dokumentiert insbesondere die *IUCN-Red List of Threatened Species*, die den Gefährdungsgrad von verschiedenen Tier- und Pflanzengruppen erfasst und bis heute rund 4% aller Tier- und Pflanzenarten berücksichtigt (IUCN 2012). So sind bei den Säugetieren bereits 100% der Arten erfasst, von denen über 20% vom Aussterben bedroht sind; bei den Gymnospermen (Nacktsamern) wurden bisher 96% aller Arten untersucht, wobei 39% davon als bedroht gelten müssen. Die tatsächlichen Aussterberaten sind schwierig zu bestimmen und werden auf 100–1000-fach höher als die normalen Hintergrundausterberaten geschätzt (cf. ROCKSTRÖM et al. 2009). In einer sorgfältigen Studie zeigen BARNOSKY et al. (2011), dass nach den fünf großen erdgeschichtlichen Massenaussterben (Ordoviz/Silur, Frasn/Famenne, Perm/Trias, Trias/Jura, Kreide/Tertiär) inzwischen das sechste, durch den Menschen verursachte Massenaussterben begonnen hat. Die Bedrohung der Biodiversität ist also ohne Zweifel real, auch wenn die quantitative Datengrundlage ungenügend ist, insbesondere hinsichtlich des Verlustes von genetischer Vielfalt, von biotischen Interaktionen oder von Lebensräumen.

3. Die Treiber des Biodiversitätsverlustes

Die Ursachen dieses aktuellen Biodiversitätsverlustes sind vielfältig, ihre relative Bedeutung bleibt umstritten. Nach SALA et al. (2000) und THULLER (2007) ist Landnutzung durch den Menschen der wichtigste Treiber des Biodiversitätsverlustes (Abb. 2). So verlieren wir laut der *Food and Agriculture Organization (FAO)* noch immer rund 130 000 ha Wald pro Jahr – ein Verlust, der durch die Zerstörung von Biotopen und gemäß einem statistischen Zusammenhang zwischen verfügbarer Fläche und Artenvielfalt („species-area-relationship“) zumindest regional unmittelbar zu einem entsprechenden Artenverlust führt.

Als zweitwichtigste Ursache des Biodiversitätsverlustes gilt meist der Klimawandel, denn alle Arten sind mit ihren Verbreitungsgebieten direkt an ein bestimmtes Klima angepasst. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Organismen sind mannigfaltig und bereits heute deutlich zu erkennen. So zeigen CHEN et al. (2011) für verschiedene terrestrische Invertebraten Großbritanniens, dass diese ihre Nordgrenze um durchschnittlich 17 km pro 10 a nordwärts verschieben. THOMAS et al. (2004) berechnen mit Hilfe von sogenannten *Species-Distribution-Modellen* für das Jahr 2050 das Aussterberisiko von Arten unter einem mittleren Erwärmungsszenario. Nach ihren Analysen, die insgesamt 20% der Landoberfläche erfassen, sollten im Untersuchungsgebiet 15–37% der Arten aussterben. Die Sensitivität von Korallen wird von FRIELER et al. (2012) untersucht. Sie zeigen, dass

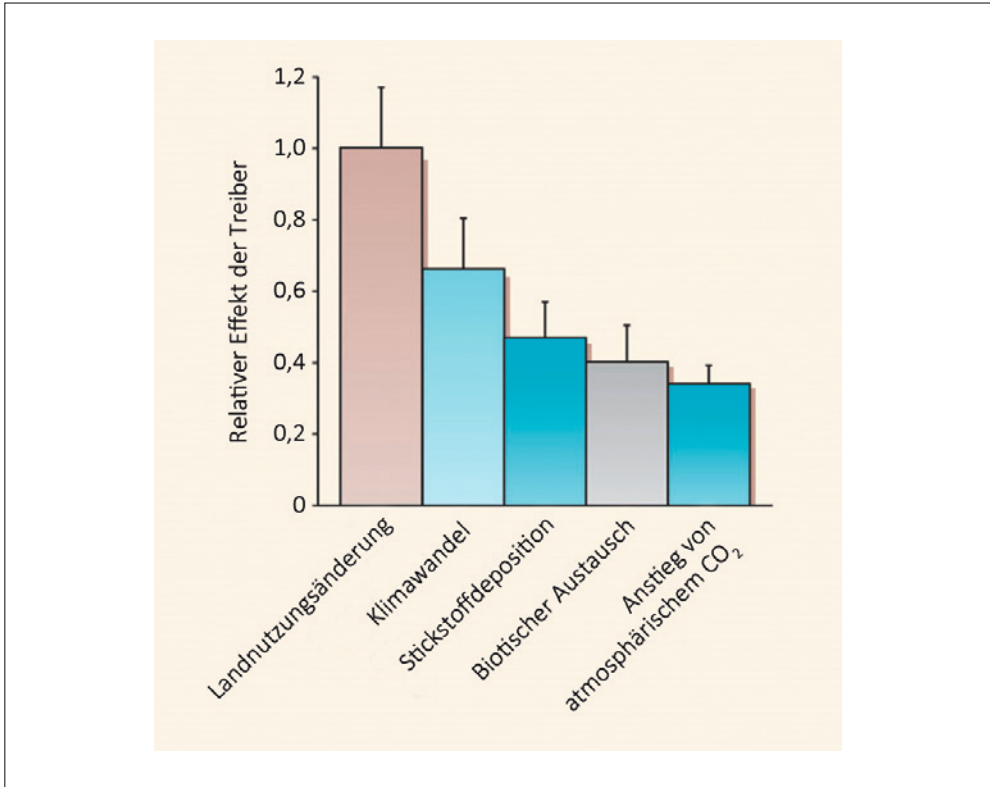


Abb. 2 Wichtige Treiber des anthropogenen Biodiversitätsverlustes und ihre relative Bedeutung. Aus THULLER 2007

bei einer Erwärmung von über 1,5°C rund 80% der Korallen verschwinden werden. Inzwischen liegen auch erste Abschätzungen zum Verlust an genetischer Vielfalt durch Klimawandel vor. BALINT et al. (2011) untersuchen mit Hilfe von *Species-Distribution-Modellen* neun Arten von Stein-, Köcher- und Eintagsfliegen und deren Überlebenschancen bis 2080 unter einem mittleren Klimawandelszenario. Unter den gegebenen Annahmen sollten lediglich 11% der berücksichtigten Morphospezies verschwinden. Die genetischen Untersuchungen belegten aber die Existenz von mehreren sogenannten „kryptischen Arten“, das sind Arten, die nur genetisch, nicht aber morphologisch unterscheidbar sind, von denen durch Klimawandel 53% aussterben sollten. Nochmals deutlich höher lagen aber die Aussterberaten bezogen auf die genetische Vielfalt, denn hier prognostizierten die Autoren unter einem geänderten Klima den Verlust von insgesamt 72% der genetischen Diversität. Die Studie belegt somit, dass die Klimaveränderungen eben nicht nur die Artenzusammensetzung, sondern insbesondere die genetische Diversität negativ beeinflussen und der „kryptische Biodiversitätsverlust“ um ein Vielfaches höher liegt als der morphologisch sichtbare. Auch diejenigen Arten, die nicht unmittelbar durch Klimawandel verschwinden, gehen als Folge der Erwärmung durch eine „genetische Bottleneck-Situation“ hindurch, die sie gegenüber anderen Störungen anfälliger macht.

Neben der anthropogenen Landnutzung ist also der Klimawandel ein besonders wirkmächtiger Treiber des Biodiversitätsverlustes. Zwei weitere wichtige Akteure repräsentieren hier die Einwanderung von neuen Arten und der Anstieg des Kohlendioxidgehaltes, die nachfolgend noch kurz durch Beispiele erläutert seien. Für die Stadt Frankfurt wurden anhand von verfügbaren Dokumentationen die Florenveränderungen zwischen den Jahren 1800 und 2000 analysiert (GREGOR et al. 2011). Innerhalb dieser Zeitspanne ging die reine Artenzahl von 1232 um 10% auf 1107 zurück. Diese Veränderung setzt sich zusammen aus einer 27%igen bzw. 26%igen Reduktion der Artenzahlen der Indigenen bzw. Archaeophyten bei gleichzeitiger über 220%igen Zunahme der Neophyten (Abb. 3). Durch das Verschwinden von einheimischen und archaeophytischen Arten und das Einwandern von Neophyten hat also nicht nur die Artenvielfalt abgenommen, sondern es sind auch neue Vergesellschaftungen entstanden. Die Thematik „neue Ökosysteme“ gewinnt so gegenwärtig rasch an Bedeutung.

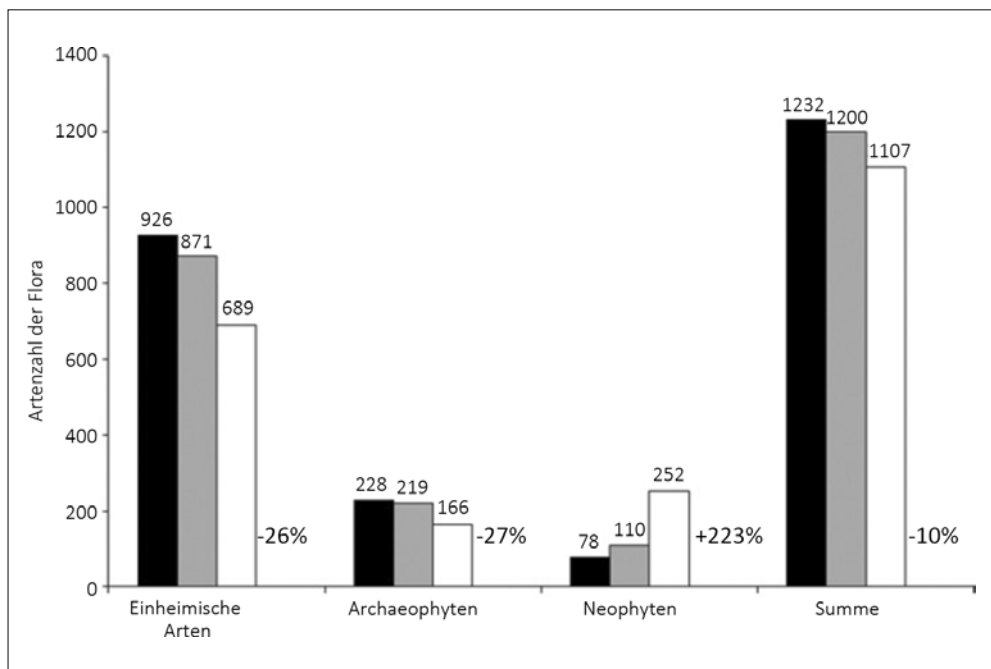


Abb. 3 Artenzahl der Flora im Stadtgebiet von Frankfurt in den Jahren 1800 (schwarze Balken), 1900 (graue Balken) und 2000 (weiße Balken); weitere Erläuterungen im Text. Aus GREGOR et al. 2011, verändert.

Der Einfluss von Klimaerwärmung, steigenden atmosphärischen Kohlendioxidgehalten und weiteren Umweltparametern auf Vegetationsänderungen in Afrika wurden von HIGGINS und SCHEITER (2012) in einer Modellanalyse untersucht. Mit Hilfe ihres „Adaptive Dynamic Global Vegetation Model“ konnten die Autoren zeigen, dass für den afrikanischen Kontinent unter den zu erwartenden Klimaveränderungen insgesamt mit einem verstärkten Übergang von einer C4-Vegetation (Grasland- oder Savannen-Vegetation) zu einer C3-Vegetation (Waldland-Vegetation) und entsprechend mit einem deutlichen Anstieg der Bewaldung zu rechnen ist. Dabei konnte der Übergang von einer C4- zu einer C3-Vegetation

und zurück im Modell durch Veränderung ganz verschiedener Umweltparameter, wie etwa Temperatur, Kohlendioxidgehalt, Niederschlag oder Feuerhäufigkeit, verursacht werden, wobei auf der lokalen Skala ein typisches „Hysteresisverhalten“ auftritt: Beim Verändern der verschiedenen Umweltparameter sind der Hinweg von einer C4- zu einer C3-Vegetation und der Weg zurück zu einer C4-Vegetation deutlich unterschiedlich (Abb. 4A). Es gibt also für die untersuchten Umweltparameter sogenannte „Tipping-Points“, bei deren Über- oder Unterschreiten ein rascher Wechsel von einer C3- zu einer C4-Vegetation bzw. von einer C4- zu einer C3-Vegetation erfolgt. Interessanterweise geht dieses Hysteresis- und *Tipping-Point*-Verhalten bei Integration über den gesamten Kontinent weitgehend verloren (Abb. 4B), offenbar weil die *Tipping-Points* auf der lokalen Skala sehr unterschiedlich liegen. Damit zeigt sich auch ein typischer Vorteil von hoher Diversität: Plötzliche Katastrophen (*Tipping-Points*) werden gedämpft und gehen in graduelle Veränderungen über.

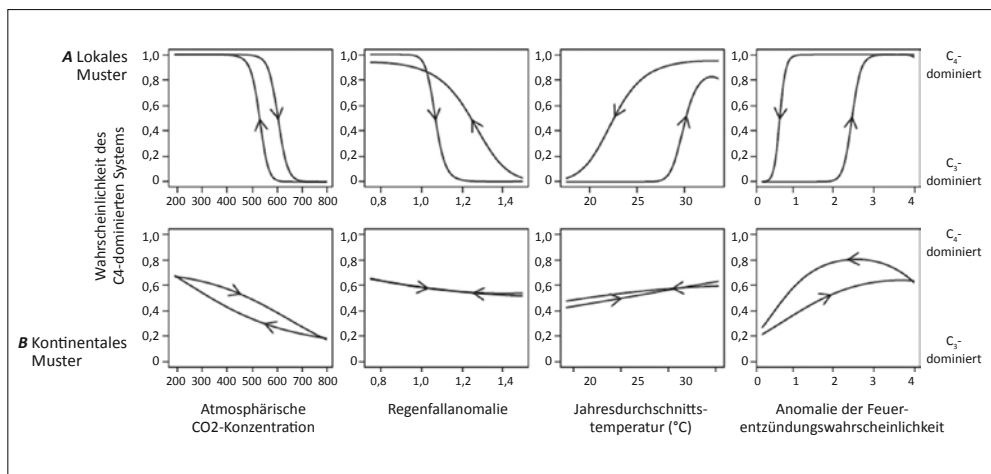


Abb. 4 Übergang von einer C4- zu einer C3-Vegetation in Afrika in Abhängigkeit von verschiedenen Umweltparametern. (A) Lokales Muster. (B) Kontinentales Muster. Weitere Erläuterungen im Text. Aus HIGGINS und SCHEITER 2012, verändert.

Insgesamt ist also die Biodiversität in ihren verschiedenen Hierarchien einerseits wenig bis gar nicht bekannt, andererseits belegt eine Fülle von Informationen, dass diese Biodiversität gegenwärtig in hohem Ausmaß bedroht und aufgrund von vielfältigen Ursachen einem raschen Wandel unterworfen ist, wobei hochkomplexe Systemübergänge auftreten können. Daraus ergibt sich naturgemäß die Frage nach den Folgen des Biodiversitätsverlustes und -wandels.

4. Die Konsequenzen des Biodiversitätsverlustes

Leider ist auch über die Bedeutung der Biodiversität bzw. des Biodiversitätsverlustes für das System Erde und für den Menschen bisher vor allem Grundsätzliches und wenig Quantitatives und Konkretes bekannt. Allgemein gilt, dass die Biodiversität über die soge-

nannten „Ökosystemdienstleistungen“ in das System Erde–Mensch einwirkt. Ökosystemdienstleistungen bezeichnen dabei ganz allgemein die *Benefits*, die den Menschen aus den Ökosystemen zufließen, und werden meist in die vier Kategorien „Provisioning Ecosystem Services“, „Regulating Ecosystem Services“, „Cultural Ecosystem Services“ und „Supporting Ecosystem Services“ eingeteilt (*Millennium Ecosystem Assessment 2005*, Abb. 5), wobei die Abgrenzung der *Supporting Ecosystem Services* von den *Regulating Ecosystem Services* durchaus umstritten ist.

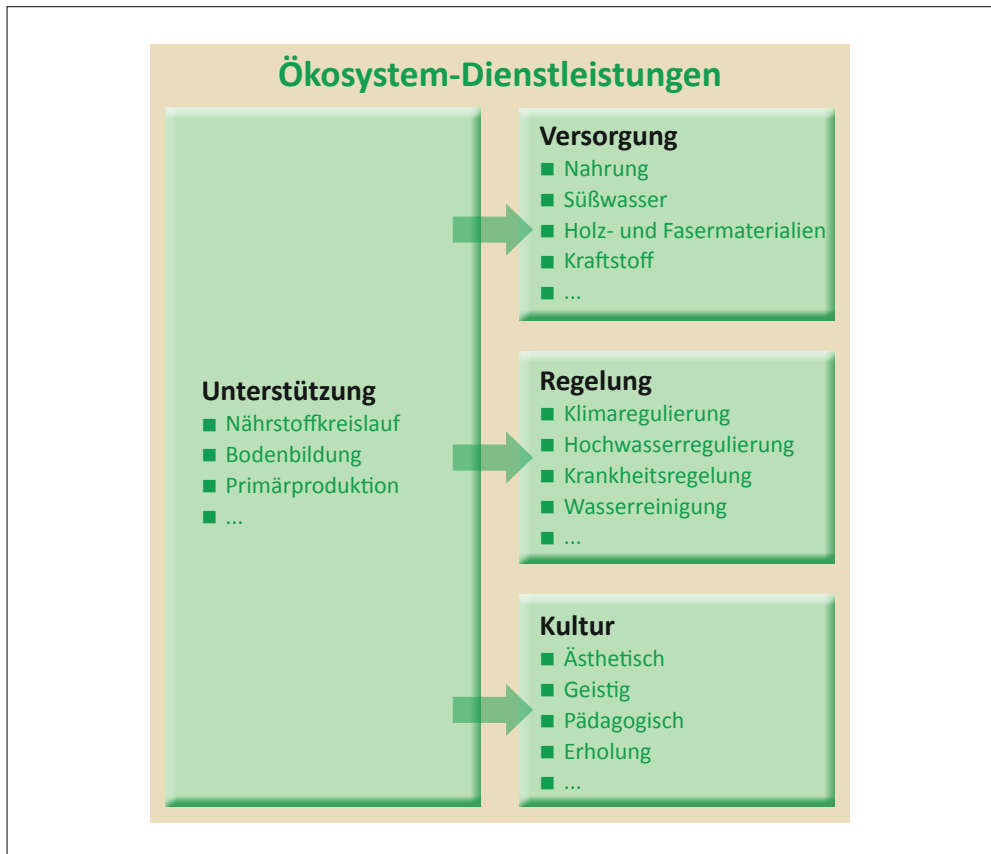


Abb. 5 Gliederung der Ökosystemdienstleistungen in vier Grundkategorien (aus *Millennium Ecosystem Assessment 2005*, verändert)

Es gibt viele Bemühungen, diese Ökosystemdienstleistungen in ihrem volkswirtschaftlichen Wert zu quantifizieren. Eine der ersten diesbezüglichen Studien stammt von COSTANZA et al. (1997), die den globalen Wert aller Ökosystemdienstleistungen auf 16–54 Billionen US \$ pro Jahr schätzen. Tatsächlich sind aber insbesondere die *Regulating*, *Cultural* und *Supporting Ecosystem Services* besonders schwierig zu quantifizieren, nicht zuletzt, weil auch Skaleneffekte eine wichtige Rolle spielen, die Bedeutung der Ökosystemdienstleistungen also auf lokaler, regionaler, kontinentaler und globaler Skala berücksichtigt werden muss. Neuere Stu-

dien beschränken sich daher eher auf ausgewählte Regionen und Ökosystemdienstleistungen, so etwa die bekannten TEEB-Studien¹ (TEEB 2008, 2010). Für instruktive Beispiele zur konkreten Bedeutung von Biodiversität sei daher auf diese Studien verwiesen sowie auf JESSEL et al. (2009). Allgemein (wenn auch nicht ohne Ausnahme) gilt, dass eine hohe Biodiversität die Leistungsfähigkeit von Ökosystemen und ihre Resilienz gegen Störungen verbessert, wie auch die oben zitierte Modellstudie von HIGGINS und SCHEITER (2012, Abb. 4) belegt.

Wie lückenhaft unser Wissen bezüglich der Bedeutung von Biodiversität und ihrer Ökosystemdienstleistungen jedoch tatsächlich ist, sei an einem kleinen Beispiel kurz erläutert. Aus zahlreichen Studien ist bekannt, dass die Produktivität in vielen Ökosystemen (insbesondere in Grasländern) mit sinkender Biodiversität abnimmt. Erst kürzlich konnten jedoch REICH et al. (2012) in einer Metastudie zeigen, dass dieser Effekt im Laufe der Zeit eskalieren kann; der durch Rückgang der Biodiversität verursachte Produktivitätsverlust steigt also im Laufe der Zeit an. Die Höhe der Ökosystemdienstleistungen hängt somit nicht nur von den biotischen und abiotischen Umweltfaktoren, sondern auch von der Vorgeschichte des Systems ab, Ökosystemdienstleistungen sind also eine „historische Größe“ mit einem Gedächtnis der Vergangenheit.

Insgesamt besteht also großer Forschungsbedarf, um die Bedeutung der Ökosystemdienstleistungen und ihre Abhängigkeit von einzelnen Arten und von Biodiversität besser zu verstehen. Hilfreich ist in diesem Zusammenhang auch ein Blick in die erdgeschichtliche Vergangenheit. Wie bereits dargestellt (siehe Kapitel 3), ist der aktuelle Biodiversitätsverlust durchaus mit erdgeschichtlichen Massenaussterben, etwa der Perm/Trias-Grenze oder Kreide/Tertiär-Grenze, vergleichbar. Von den fünf großen Massenaussterben („big-five mass extinctions“, siehe oben) weiß man, dass sie auch einen drastischen Einbruch des Kohlenstoffkreislaufes verursachten, der in den Kohlenstoffisotopenverhältnissen von Karbonaten und organischem Kohlenstoff gut dokumentiert ist. Von besonderem Interesse ist dabei die Erholungsphase nach dem Massenaussterben. Während „schon“ nach rund einer Million Jahre der Kohlenstoffkreislauf wieder seine alten Werte erreicht, braucht es rund fünf Millionen Jahre, um die ursprüngliche Biodiversität bezüglich der Arten wieder herzustellen (z. B. LOOY et al. 1999, WILF et al. 2005).

Zwei Lehren lassen sich daraus ziehen: Zum einen hinterlässt der Mensch mit seinem anthropogen verursachten Biodiversitätsverlust bereits heute ein ökologisches Signal, das vermutlich noch für rund fünf Millionen Jahre erkennbar sein wird. Zum anderen zeigt sich auch hier, dass die natürliche Biodiversität eine hohe Redundanz aufweist und entscheidend zur Systemresilienz beiträgt; nur so ist zu erklären, dass nach einem Massenaussterben die ursprüngliche Ökosystemdienstleistung bezogen auf den Kohlenstoffkreislauf bereits nach einer Million Jahre, die ursprüngliche Biodiversität aber erst nach weiteren vier Millionen Jahren erreicht wird. Die Erdgeschichte hält aber noch eine weitere Lehre parat. Die aktuelle globale Erwärmung stellt für sich genommen keine grundsätzliche Problematik für das Leben auf dieser Erde und die Menschheit dar, wohl aber für die diversen menschlichen Gesellschaften, die mit allen ihren Strukturen an ganz bestimmte Klima- und Meeresspiegelverhältnisse angepasst sind. So existierten zur Zeit des Eozäns vor rund 50 Millionen Jahre global auf unserem Planeten weitgehend eisfreie Verhältnisse mit wesentlich (Faktor 3–5) höheren Kohlendioxidgehalten bei gleichzeitig sehr üppigem, gemäßigt bis subtropischem Leben bis in hohe Breiten (PROSS et al. 2012, UTESCHER und MOSBRUGGER 2007).

1 TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity.

5. Schlussfolgerung – Was ist zu tun?

Die Bilanz der bisherigen Betrachtung ist ernüchternd:

- Die Biodiversität repräsentiert zwar eine Schlüsselkomponente des Erdsystems und *das* Charakteristikum des Planeten Erde, ist in ihren Dimensionen bisher aber nicht bekannt.
- Der Mensch verursacht gegenwärtig einen großen Biodiversitätsverlust, der den aus der Erdgeschichte bekannten Massenaussterben durchaus gleicht, in seiner tatsächlichen Größenordnung bisher aber nicht quantifiziert werden kann.
- Es gibt zahlreiche Treiber des anthropogenen Biodiversitätsverlustes, darunter insbesondere die Landnutzung und den Klimawandel; eine Reduktion des Artensterbens ist entsprechend schwierig.
- Die Konsequenzen des anthropogenen Biodiversitätsverlustes sind systemischer Natur, weitreichend und lang andauernd, konkret bisher aber nicht umfassend verstanden.

Mit Bezug auf den „Globalen Wandel“ der Biodiversität gilt also die sokratische Erkenntnis in besonderem Maße: „Ich weiß, dass ich nichts weiß.“ Erschwerend kommt hinzu, dass die Biodiversitätsproblematik mit ihren komplexen Vernetzungen von den Führungseliten weltweit weitgehend vernachlässigt wird. So taucht z. B. das Thema Biodiversität in den *Global Risks Reports* 2012 und 2013, wie sie auf dem *World Economic Forum* in Davos vorgestellt wurden, gar nicht erst auf (Abb. 6). Die internationalen Fortschritte hinsichtlich einer Verbesserung des Biodiversitätsschutzes sind entsprechend marginal.

Was ist also zu tun? Fünf Maßnahmenfelder erscheinen hier besonders wichtig:

- Zunächst ist die internationale Forschung gefordert, dem Thema Biodiversität – neben dem Klimawandel – größere Aufmerksamkeit zu widmen, um eine deutlich verbesserte Grundlage für Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität bereitzustellen. Notwendig ist hier insbesondere eine auf ein Systemverständnis ausgerichtete Feld- und empirische Forschung sowie ein Ausbau der integrativen Modellierung. Auf nationaler Ebene waren die Einrichtung des Biodiversität-und-Klima-Forschungszentrums in Frankfurt (www.bik-f.de) im Jahr 2008 und des DFG-Forschungszentrums „Integrative Biodiversitätsforschung“ (www.idiv-biodiversity.de) im Jahr 2012 wichtige Schritte in diese Richtung.
- Aufgrund der Systemkomplexität kann es – ähnlich wie beim Klimawandel – keine Optimumlösung, keinen „Masterplan“ zum Schutz der Biodiversität geben. Vielmehr muss ein „evolutionärer Ansatz“ verfolgt werden, der auf Diversität der Maßnahmen sowie auf „Versuch und Irrtum“ basiert und in der Größenordnung skalierbar ist. Entsprechend muss das Thema „Erdsystemmanagement“ bzw. „Geoengineering“ (im weiteren Sinne verstanden und nicht nur auf *Climate Engineering* beschränkt) ernsthaft angegangen werden, und zwar ebenso mit kleinen, skalierbaren Maßnahmen. Es muss ein Weg gefunden werden, um von dem gegenwärtigen unkontrollierten „Erdsystemraubbau“ zu einem verantwortungsbewussten, auf Wissen um die Systemzusammenhänge geprägten Erdsystemmanagement zu kommen.

Globale Risiken			
2012*		2013*	
Deutliche Einkommensunterschiede	Deutliche Einkommensunterschiede	Schwerer systemrelevanter Finanzzusammenbruch	Schwerer systemrelevanter Finanzzusammenbruch
Chronische Unausgeglichenheit der öffentlichen Finanzen	Chronische Unausgeglichenheit der öffentlichen Finanzen	Wasserversorgungskrisen	Wasserversorgungskrisen
Steigende Treibhausgasemissionen	Steigende Treibhausgasemissionen	Lebensmittelknappheit	Chronische Unausgeglichenheit der öffentlichen Finanzen
Cyber-Attacken	Wasserversorgungskrisen	Chronische Unausgeglichenheit der öffentlichen Finanzen	Lebensmittelknappheit
Wasserversorgungskrisen	Nichtbewältigung der Probleme alternder Bevölkerungen	Extreme Volatilität der Energie- und Agrarpreise	Verbreitung von Massenvernichtungswaffen
A		B	

Abb. 6 Einschätzung der fünf wichtigsten globalen Risiken in den Jahren 2012 und 2013, (A) bezogen auf die Wahrscheinlichkeit des Eintretens und (B) bezogen auf den erwartenden Impact. Aus *Global Risks Report 2013*, verändert.

- Die Nutzung von Natur muss kosten, die Internalisierung externer Kosten weiter vorangetrieben werden. Neben den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen sind es wesentlich politisch-wirtschaftliche Systeme, die langfristig sicherstellen können, dass sich der globale ökologische Fußabdruck auf einen nachhaltigen Wert einpendelt.
- Die großen Kenntnislücken und Unsicherheiten dürfen keine Rechtfertigung für Nicht-Handeln sein. Einerseits müssen „evolutionäre Maßnahmen“ entwickelt werden (siehe oben), andererseits stehen „No-regret-Maßnahmen“ zur Verfügung, die sich letztlich immer positiv auswirken. Hierzu gehören etwa der Schutz noch vorhandener Natur sowie das Pflanzen von Bäumen, die sowohl bezüglich Klimawandel als auch beim Schutz der Biodiversität positive Wirkung entfalten. Es ist nicht zufällig, dass China heute das weltweit größte Aufforstungsprogramm betreibt.
- Das Thema „Natur“ muss verstärkt Gegenstand der Bildung werden. Die Entwicklung eines nachhaltigen Umganges mit der Natur erfordert naturwissenschaftliche Erkenntnisse und ein entsprechendes gesellschaftliches Bewusstsein und Verständnis. Charles Percy SNOW (1959) hat die Existenz zweier sich weitgehend sprachlos gegenüberste-

henden Kulturen, nämlich der „sciences“ und der „humanities“, identifiziert und beklagt, wobei die Literatur und die schönen Künste den gesellschaftlichen Dialog und die Feuilletons beherrschen, während die Naturwissenschaft und die Technik als zweite Kultur weitgehend auf die Experten beschränkt bleiben. SNOW (1963) und John BROCKMAN (1995) fordern daher zu Recht eine „Dritte Kultur“, die zwischen beiden vermittelt und auch die Natur- und Technikwissenschaften gesellschaftsfähig macht.

Literatur

- BÁLINT, M., DOMISCH, S., ENGELHARDT, C. H. M., HAASE, P., LEHRIAN, S., SAUER, J., THEISSINGER, K. T., PAULS, S. U., and NOWAK, C.: Cryptic biodiversity loss linked to global climate change. *Nature Climate Change* 1, 313–318 (2011)
- BARNOSKY, A. D.: Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 51–57 (2011)
- BROCKMAN, J.: *The Third Culture. Beyond the Scientific Revolution*. New York: Touchstone 1995
- CHEN, I.-C., HILL, J. K., OHLEMÜLLER, R., ROY, D. B., and THOMAS, C. D.: Rapid range shifts of species associated with high levels of climate change. *Science* 333, 1024–1026 (2011)
- COSTANZA, R., D'ARGE, R., GROOT, R. DE, FARBER, S., GRASSO, M., HANNON, B., LIMBURG, K., NAEEM, S., O'NEILL, R. V., PARUELO, J., RASKIN, R. G., SUTTON, P., and VAN DEN BELT, M.: The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253–260 (1997)
- FRIELER, K., MEINSHAUSEN, M., GOLLY, A., MENGEL, M., LEBEK, K., DONNER, S. D., and HOEGH-GULDBERG, O.: Limiting global warming to 2°C is unlikely to save most coral reefs. *Nature Climate Change* 3, 165–170 (2012)
- Global Risks Report*: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2012.pdf (2012)
- Global Risks Report*: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalRisks_Report_2013.pdf (2013)
- GREGOR, T., BÖNSEL, D., STARKE-OTTICH, I., and ZIZKA, G.: Drivers of floristic change in large cities – A case study of Frankfurt/Main (Germany). *Landscape and Urban Planning* 104, 230–237 (2011)
- HIGGINS, S. I., and SCHEITER, S.: Atmospheric CO₂ forces abrupt vegetation shifts locally, but not globally. *Nature* doi:10.1038/nature11238 (2012)
- IISE* (International Institute for Species Exploration): State of Observed Species 2011. <http://species.asu.edu/SOS> (2012)
- IUCN* (International Union for Conservation of Nature): The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2012.2. <http://www.iucnredlist.org>. 2012 (Downloaded on 17 October 2012)
- JESSEL, B., TSCHIMPKE, O., und WALSER, M.: *Die Produktivkraft der Natur*. Hamburg: Hoffmann und Campe 2009
- LOOY, C. V., BRUGMAN, W. A., DILCHER, D. L., and VISSCHER, H.: The delayed resurgence of equatorial forests after the Permian-Triassic ecologic crisis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 13857–13862 (1999)
- Millennium Ecosystem Assessment*: Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Washington (DC): World Resources Institute 2005
- PROSS, J., et al.: Persistent near-tropical warmth on the Antarctic continent during the early Eocene epoch. *Nature* 488, 73–77 (2012)
- REICH, P. B., TILMAN, D., ISBELL, F., MUELLER, K., HOBBI, S. E., FLYNN, D. F. B., and EISENHAEUER, N.: Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science* 336, 589–592 (2012)
- ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN, F. S., LAMBIN, E. F., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H. J., NYKVIK, B., WIT, C. A. DE, HUGHES, T., VAN DER LEEUW, S., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P. K., COSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R. W., FABRY, V. J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P., and FOLEY, J. A.: A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009)
- SALA, O. E., CHAPIN, F. S., ARMESTO, J. J., BERLOW, E., BLOOMFIELD, J., DIRZO, R., HUBER-SANWALD, E., HUENNEKE, L. F., JACKSON, R. B., KINZIG, A., LEEMANS, R., LODGE, D. M., MOONEY, H. A., OESTERHELD, M., POFF, N. L., SYKES, M. T., WALKER, B. H., WALKER, M., and WALL, D. H.: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287, 1770–1774 (2000)
- SNOW, C. P.: *The Two Cultures*. Cambridge: Cambridge University Press 1959
- SNOW, C. P.: *The Two Cultures: A Second Look*. Cambridge: Cambridge University Press 1963

- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity): The Economics of Ecosystems and Biodiversity. An Interim Report. 2008
- TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity): The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB. 2010
- THOMAS, C. D., CAMERON, A., GREEN, R. E., BAKKENES, M., BEAUMONT, L. J., COLLINGHAM, Y. C., ERASMUS, B. F. N., FERREIRA DE SIQUEIRA, M., GRAINGER, A., HANNAH, L., HUGHES, L., HUNTLEY, B., VAN JAARSVELD, A. S., MIDGLEY, G. F., MILES, L., ORTEGA-HUERTA, M. A., PETERSON, A. T., PHILLIPS, O. L., and WILLIAMS, S. E.: Extinction risk from climate change. *Nature* 427, 145–148 (2004)
- THULLER, W.: Climate change and the ecologist. *Nature* 448, 550–552 (2007)
- UTESCHER, T., and MOSBRUGGER, V.: Eocene vegetation patterns reconstructed from plant diversity – a global perspective. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 247, 243–271 (2007)
- WHEELER, Q. D., KNAPP, S., STEVENSON, D. W., STEVENSON, J., BLUM, S. D., BOOM, B. M., BORISY, G. G., BUIZER, J. L., CARVALHO, M. R. DE, CIBRIAN, A., DONOGHUE, M. J., DOYLE, V., GERSON, E. M., GRAHAM, C. H., GRAVES, P., GRAVES, S. J., GURALNICK, R. P., HAMILTON, A. L., HANKEN, J., LAW, W., LIPSCOMB, D. L., LOVEJOY, T. E., MILLER, H., MILLER, J. S., NAEEM, S., NOVACEK, M. J., PAGE, L. M., PLATNICK, N. I., PORTER-MORGAN, H., RAVEN, P. H., SOLIS, M. A., VALDECASA, A. G., VAN DER LEEUW, S., VASCO, A., VERMEULEN, N., VOGEL, J., WALLS, R. L., WILSON, E. O., and WOOLLEY, J. B.: Mapping the biosphere: exploring species to understand the origin, organization and sustainability of biodiversity. *Systematics and Biodiversity* 10, 1–20 (2012)
- WILF, P., LABANDEIRA, C. C., JOHNSON, K. R., and ELLIS, B.: Decoupled plant and insect diversity after the end-Cretaceous extinction. *Science* 313, 1112–1115 (2005)

Prof. Dr. Dr. h. c. Volker MOSBRUGGER
Forschungsinstitut Senckenberg
Senckenberganlage 25
60325 Frankfurt (Main)
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 69 97075125
Fax: +49 69 97075137
E-Mail: volker.mosbrugger@senckenberg.de

Spuren des Klimawandels: Von den großen Ozeanen zu den kleinen Gletschern im Hochgebirge

Thomas MÖLG (Berlin)

Mit 6 Abbildungen



Zusammenfassung

Die raumzeitlichen Zusammenhänge im Klimasystem sind eine abseits der Klimaforschung wenig beachtete und bekannte Tatsache. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist allerdings entscheidend für die Beurteilung, wie sich der großräumige Klimawandel in den verschiedenen Regionen der Erde äußert. Dieser Vortrag bringt anhand der schrumpfenden Gletscher am Kilimandscharo die Dynamik von Prozessen im Klimasystem und ihre Interaktion in verschiedenen Raum/Zeit-Dimensionen näher. Nicht nur direkte meteorologische Messungen, sondern auch physikalisch basierte Modelle verschiedener Komponenten des Klimas werden hierfür methodisch vereint. Das Beispiel demonstriert, wie sich der Zustand lokaler Klimaphänomene von wenigen Quadratkilometern Größe (die Gletscher) über komplexe Verknüpfungen bis ins großräumige Klimageschehen zurückverfolgen lässt, und wie in diesen Wechselwirkungen die Dynamik im Indischen Ozean, die regionale Strömung um das Gebirge sowie lokale Energie- und Massenflüsse an der Gletscheroberfläche eine Kausalitätskette bilden.

Abstract

Space-time linkages in the climate system are hardly known and appreciated outside of climatology. However, knowledge of these linkages is essential to understand how large-scale climate change is manifested in different regions of the planet. Using the shrinking glaciers on the top of Kilimanjaro as an example, this talk presents an overview of climate system processes and their interactions across various space/time dimensions. Direct meteorological measurements as well as models of different climate components provide the methodological basis. The case study shows how changes in very small climatic phenomena (the glaciers) can be traced back to large-scale climate activity, and it illustrates the ways of interaction in which the Indian Ocean, the regional atmospheric flow above the mountain, and local mass and energy fluxes at the glacier surface maintain a causality chain.

1. Einführung und Motivation

Besonders nach extremen Ereignissen wie sehr heißen Sommern, Überflutungen oder Wirbelstürmen drängt es die Menschheit zur Frage nach der eindeutigen Ursache. War es nun die globale Erwärmung, eine Besonderheit der regionalen Niederschläge oder gar der El Niño im Pazifischen Ozean? Auch wenn es für klimatisch gesteuerte Ereignisse immer einen direkten Grund, also die meteorologischen Zustände vor Ort gibt, lassen sich die genannten Ursachen aus wissenschaftlicher Sicht nie vollständig voneinander abgrenzen. Denn das Klima besteht aus vielen Komponenten, die in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Dimensionen (den sogenannten *Skalen*) interagieren. Diese inhärente Eigenschaft des Klimas ist der Allgemeinheit aber oftmals nicht bewusst und nicht bekannt. Im vorliegenden Text, der auf meinem Vortrag bei der Leopoldina-Jahrestagung basiert, möchte ich Sie deshalb auf eine „Reise“ durch das Klimasystem mitnehmen, die uns wie im Titel angegeben durch verschiedene Komponenten des Klimas führt und ihre Wechselwirkungen verdeutlicht. Als Basis dafür dient die – auch in der Öffentlichkeit – viel beachtete Diskussion „Gletscherrückgang-Klimawandel“.

In diesem Zusammenhang werden immer wieder zwei Tatsachen deutlich. Auf der einen Seite sehen wir Gletscher, die innerhalb weniger Jahrzehnte ihre Fläche markant verkleinert haben. Dies spiegelt sich in den wissenschaftlichen Daten des Gletscherzustandes wider (z. B. KASER et al. 2006). Auf der anderen Seite weisen die langzeitlichen Temperaturverläufe in vergletscherten Regionen, ähnlich der globalen Temperaturentwicklung, in den jüngsten Dekaden ein Niveau auf, das seit Beginn der Messungen und für die moderne menschliche Zivilisation einzigartig ist. Die regionale Temperatur der Alpen etwa, die seit Mitte des 18. Jahrhunderts gut dokumentiert ist, zeigt in den letzten drei Jahrzehnten einen unverkennbaren Trend zu höheren Werten als zuvor (AUER et al. 2007). Die bodennahe Lufttemperatur ist ohne jeden Zweifel einer der wichtigsten Indikatoren für das Klimasystem und auch für Gletscher. Der hiesige Beitrag soll jedoch vorführen, dass Gletscheränderungen mehr als nur eine Temperaturinformation liefern. Vor allem können sie eine Grundlage bieten, um das Verständnis der oben angedeuteten Interaktionen im Klimasystem zu verbessern, und somit eine essenzielle Frage anzugehen: Wie äußern sich großräumige oder globale Klimatrends in verschiedenen Regionen der Erde?

Gletscher im Hochgebirge haben in diesem Kontext einen entscheidenden Vorteil, denn sie liegen in Luftschichten, aus denen es relativ wenig Daten gibt. Die meisten Klimadaten stammen aus den untersten 1000 m über Meereshöhe (siehe z. B. Stationsliste der Weltmeteorologischen Organisation [WMO]). Wäre es also nicht ideal, wenn wir einen Punkt an der Erdoberfläche hätten, der möglichst isoliert in höhere Luftschichten hineinragt? Und wäre es nicht noch besser, wenn dieser Punkt ein klimaempfindliches Phänomen aufweist, das uns Rückschlüsse auf einen langfristigen Klimawandel erlaubt? Mit diesen Gedanken haben wir vor etwa zehn Jahren meteorologische und glaziologische Messungen am Gipfel des Kilimandscharo initiiert. Von Beginn an folgten wir dabei der Hypothese, dass die vollkommen exponierte Lage der dortigen Gletscher auf einem freistehenden Berg (Abb. 1) auch ein guter Indikator für den großräumigen Klimawandel sein muss, denn der dauerhafte Rückgang der Gletscher ist seit den 1880er Jahren gut belegt (MEYER 1891, CULLEN et al. 2013).



Abb. 1 Blick auf den Kilimandscharo ($37,4^{\circ}$ Ost, $3,1^{\circ}$ Süd) aus einer Befliegung. Die Gletscher am Gipfel sind für die Klimaforschung wie eine „Stichprobe“ der atmosphärischen Bedingungen in der mittleren tropischen Troposphäre. Foto: Georg KASER.

Zwischen 2000 und 2008 sind daher vier automatische Wetterstationen in Betrieb gegangen, die uns seit dieser Zeit kontinuierliche Messungen liefern (z. B. MÖLG und HARDY 2004, MÖLG et al. 2009a). Ergänzt wurden diese durch Spezialexperimente während der Feldarbeiten, etwa die Messung des Energietransports durch kleinräumige Luftwirbel im Juli 2005 (CULLEN et al. 2007). Das folgende Kapitel zeigt den Wert und Einsatz dieser Daten genauer.

2. Lokale Prozesse am Gletscher

Zu Beginn dieses Kapitels muss die Frage erläutert werden, in welchem Verhältnis Gletscher und Klima überhaupt zueinander stehen. Das lokale Klima steuert unmittelbar, also ohne Verzögerung, das Volumen und die Masse eines Gletschers. Vereinfacht gesagt, ergibt die Rechnung Schneefall minus Schmelze minus Sublimation (Übergang von Eis/Schnee zu Wasserdampf) die *Massenbilanz* des Gletschers, die zeigt, wie viel Kilogramm pro Quadratmeter und Jahr ein Gletscher an Masse verliert (Summe negativ) oder gewinnt (Summe positiv). Schneefall wird vor allem durch den festen Niederschlag des lokalen Klimas zur Verfügung gestellt. Schmelze und Sublimation hingegen benötigen Energie, und diese kommt aus der Atmosphäre etwa in Form von warmer Luft oder der Sonnenstrahlung (siehe unten). Dies ist das physikalische Grundprinzip der Zusammenhänge Gletscher – Klima.

Die verfeinerte Theorie dieser Vorgänge ist in der Wissenschaft als Energie- und Massenbilanzmodelle des Gletschers im Einsatz (z. B. KLOK und OERLEMANS 2002, MÖLG et al. 2008). Die auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik beruhenden Rechenmodelle benötigen als Input den atmosphärischen Zustand unmittelbar über dem Gletscher: Lufttemperatur und -feuchte, Windgeschwindigkeit, Luftdruck, Niederschlag und Bewölkung (oder atmosphärische Strahlung), typischerweise als Stundenwerte. Mit diesem „Antrieb“ löst das Modell anschließend die *Energiebilanz* des Gletschers (z. B. VAN DEN BROEKE et al. 2011), also quantifiziert die auftretenden Energieflüsse wie kurzwellige (von der Sonne verursachte) Einstrahlung und deren Reflexion an der Oberfläche, Einstrahlung und Emission terrestrischer Strahlung, turbulente Energieströme und Wärmestrom im Inneren des Gletschers.

Aus der Energiebilanz generiert das Modell dann die Massenflüsse der Schmelze, Sublimation, Wiedergefrieren von Wasser im Schnee, Tau- und Reifbildung an der Oberfläche, und zusammen mit dem festen Niederschlag ergibt das die vorhin genannte Massenbilanz.

Bevor man die Modelle zum Erkenntnisgewinn nutzen kann, müssen sie anhand unabhängiger Messungen evaluiert werden. Üblicherweise sind dies die gemessene Gletscheroberflächentemperatur und die Änderung der Oberfläche (Absenkung bei Massenverlust, Anstieg bei Massengewinn), die beide kein Modell-Input sind. Auch Temperaturmessungen im Inneren des Gletschers eignen sich dafür (z. B. KUIPERS MUNNEKE et al. 2009, MÖLG et al. 2012). Abbildung 2 zeigt die Evaluierung für den Kersten-Gletscher am Kilimandscharo über eine Periode von etwa drei Jahren. Natürlich sind auch physikalische Modelle niemals perfekt und jeder lokalen Eigenheit gerecht. Erhält man aber eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Modellergebnissen (Abb. 2), deutet dies an, dass die wichtigsten Prozesse im Modell erfasst sind. Zusätzliches Vertrauen in ein Modell liegt vor, wenn es gute Ergebnisse in verschiedenen Klimazonen liefert (z. B. MÖLG et al. 2009a, 2012).

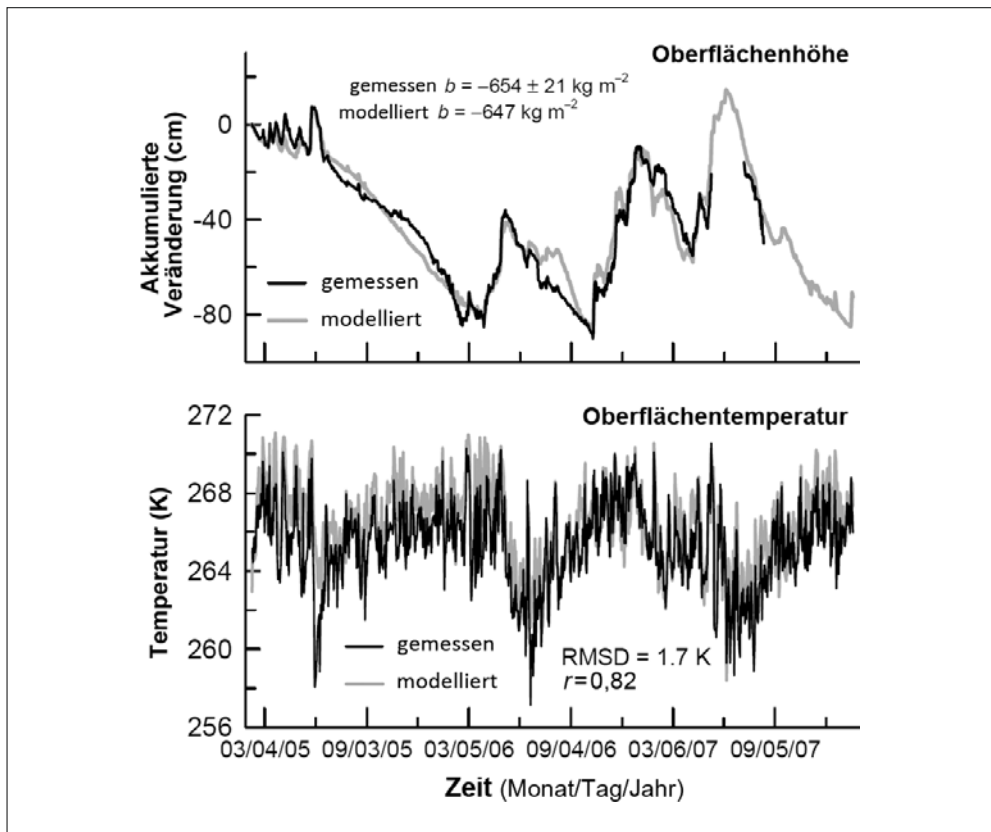


Abb. 2 Gemessene und modellierte (*oben*) Höhenänderung der Gletscheroberfläche relativ zum Startzeitpunkt (mit Angabe der Massenbilanz, b , über den gesamten Zeitraum) und (*unten*) Tagesmittel der Gletscheroberflächentemperatur mit den statistischen Maßen „root-mean-square difference“ (RMSD) und Korrelationskoeffizient (r) an der Automatischen Wetterstation 3 auf dem Südlichen Eisfeld des Kilimandscharo. Quelle: MÖLG et al. 2009a, modifiziert.

Was wir aus den Modellergebnissen vor allem lernen, betrifft die Größenordnungen der verschiedenen Energieflüsse, exemplarisch für das Nördliche Eisfeld am Kilimandscharo in Abbildung 3. Ohne in Details gehen zu müssen, tritt die absorbierte Sonnenstrahlung (gelber Balken) als jener Fluss hervor, der die Variabilität der Energiebilanz dominiert.

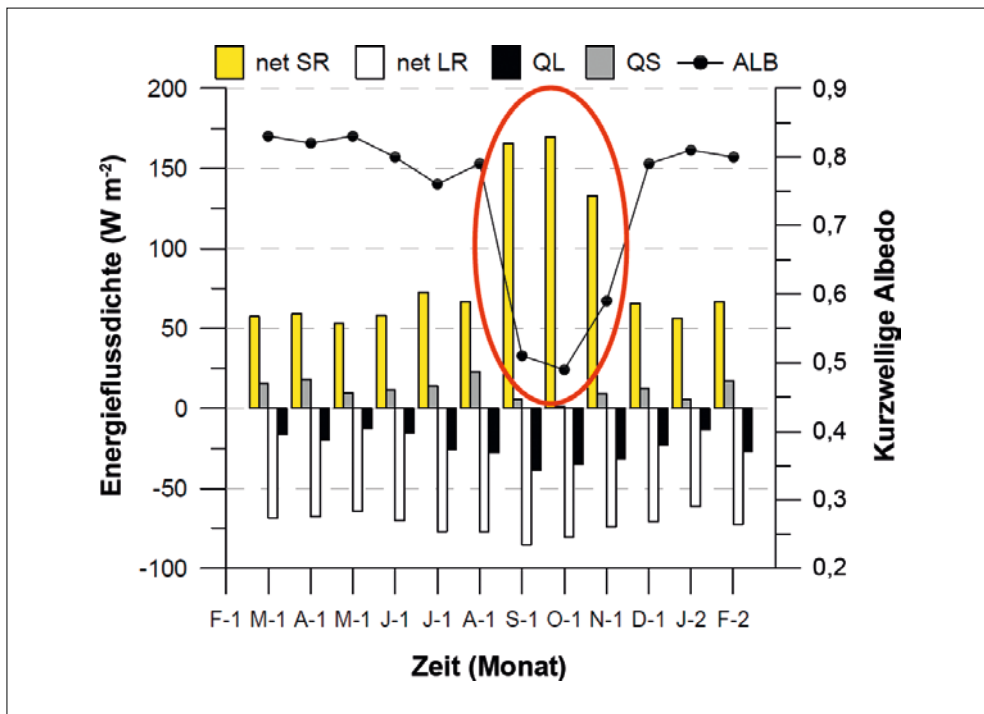


Abb. 3 Monatsmittel der Energieflüsse an der Automatischen Wetterstation 1 am Nördlichen Eisfeld des Kilimandscharo zwischen Februar 2001 und Februar 2002: absorbierte Sonnenstrahlung (gelb), Budget der langwelligen terrestrischen Strahlung (weiß), turbulenter latenter (schwarz) und fühlbarer (grau) Wärmestrom. Die mittlere monatliche Albedo (schwarze Linie) ist das Verhältnis von reflektierter zu einfallender kurzwelliger Sonnenstrahlung und bezieht sich auf die rechte y-Achse. Die Ellipse markiert eine im Text angesprochene Periode im Jahr 2001. Datenquelle: MÖLG und HARDY 2004.

Die absorbierte Sonnenstrahlung hängt wiederum stark vom Reflexionsvermögen der Oberfläche, der sogenannten *Albedo*, ab. Sobald die Reflexion im Zuge einer dunkleren Oberfläche abnimmt, in Abbildung 3 zwischen September und November 2001, steigt die absorbierte Sonnenstrahlung an und die Energie für Massenverlustprozesse (Schmelze, Sublimation) ebenso. Die Variabilitäten der Energiebilanz unterscheiden sich je nach Lage eines Gletschers (Höhe, Klimazone, lokale Besonderheiten), ein Fall wie in Abbildung 3 zeigt uns jedoch deutlich, dass die Gletschermasse fast uneingeschränkt vom Niederschlag gesteuert wird. Dieser kontrolliert hier nicht nur den Massengewinn (Schneefall), sondern über den Albedoeffekt auch das Energieangebot für den Massenverlust, denn nur häufiger Schneefall macht die Oberfläche hell und erhöht das Reflexionsvermögen. Die Luft-

temperatur kann die Kontrolle über den Albedoeffekt nur erlangen, wenn sie regelmäßig über 0°C steigt und somit die Phase des Niederschlags (fest, flüssig) stark beeinflusst. Letzteres gilt für die meisten Gletscher der Welt, nicht jedoch am Kilimandscharo, wo der Niederschlag in der vergletscherten Höhenzone fast ausschließlich fest ist. Das Schrumpfen der Kilimandscharo-Gletscher seit dem späten 19. Jahrhundert aufgrund eines lokalen Mangels an Niederschlag (Schneefall) ist daher ein sehr gut belegtes Ergebnis der bisherigen Forschungen (MÖLG und HARDY 2004, MÖLG et al. 2008, 2009a).

3. Großräumige Klimadynamik und der Ozean

Die nächste Frage war nun, welche Faktoren eigentlich Niederschlagsschwankungen in Ostafrika verursachen. Generell muss man dazu sagen, dass die Region im Jahresverlauf zwei Feuchtzeiten erlebt: März bis Mai, welche relativ zuverlässig ist, und Oktober bis Dezember, die eine hohe Schwankung von Jahr zu Jahr aufweist. Eine Fülle von Studien hat gezeigt, dass überdurchschnittlich viel Niederschlag oftmals eine Reaktion auf das El-Niño-Phänomen im Pazifik ist (z. B. INDEJE et al. 2000). Noch viel größere positive Abweichungen aber, vor allem in der zweiten Feuchtzeit, entstanden nach einem ähnlichen Vorgang im Indischen Ozean, der in die Literatur als *Indian Ocean Zonal Mode* (IOZM) einging (SAJI et al. 1999, WEBSTER et al. 1999). Der Zyklus des IOZM beginnt mit der Änderung küstenparalleler Winde vor Sumatra im April/Mai. Dieser folgt die komplette Umkehr des Temperaturgradienten der Meeresoberfläche entlang des Äquators in den kommenden Monaten, so dass der Indik nun im Westen wärmer ist als im Osten. Zeitgleich werden die üblichen Westwinde entlang des Äquators durch Ostwinde ersetzt, was letztlich überdurchschnittlich viel Niederschlag in Ostafrika auslöst. Das Langzeitverhalten des IOZM war daher ein Fokus in unserer Forschung zur Klimadynamik.

Da Messungen der Ozeantemperatur vor 1900 kaum zuverlässig sind, entschieden wir uns für eine Simulation des großräumigen Klimas mit einem globalen Klimamodell, um die Aktivität des IOZM seit 1800 zu untersuchen (MÖLG et al. 2006). Wie das Gletschermodell in Abschnitt 2 wurde auch das globale Klimamodell evaluiert und seine Güte hinsichtlich unseres Aspektes mit Messungen aus dem 20. Jahrhundert bestätigt. Die Analyse der Prozesse im Modell zeigte dann ein duales Bild (Abb. 4): 1820–1880 mit drei IOZM-Events, nach 1880 mit nur mehr einem IOZM-Event pro Jahrzehnt. Diese Ergebnisse sind im Einklang mit einer Periode A in Abbildung 4, als ostafrikanische Seen zu steigen begannen (NICHOLSON 2001), und mit einer Periode B, in der die Seen vom Hochstand fielen und die Gletscher in Ostafrika zu schrumpfen begannen (KASER und OSMASTON 2002). Ein sehr ähnlicher zeitlicher Verlauf der IOZM-Aktivität zeigte sich zudem aus Analysen von Sedimentschichten und Korallen (ABRAM et al. 2008, NAKAMURA et al. 2009) und historischen Beobachtungen (HASTENRATH 2001). Diese erstaunliche Konsistenz zwischen völlig unterschiedlichen Datensätzen legt nahe, dass es im späten 19. Jahrhundert zu einer ziemlich abrupten Änderung der Dynamik im Indischen Ozean gekommen sein muss.

Wir haben also vorerst ein stimmiges Ergebnis zwischen einerseits weniger Feuchtezufuhr nach Ostafrika durch den Indischen Ozean und andererseits einem lokalen Gletscherrückgang durch zu wenig Schneefall. Es gibt aber an diesem Punkt noch zwei entscheidende Probleme in der Kausalitätskette der Verknüpfungen. *Erstens* erreichen die Luft-

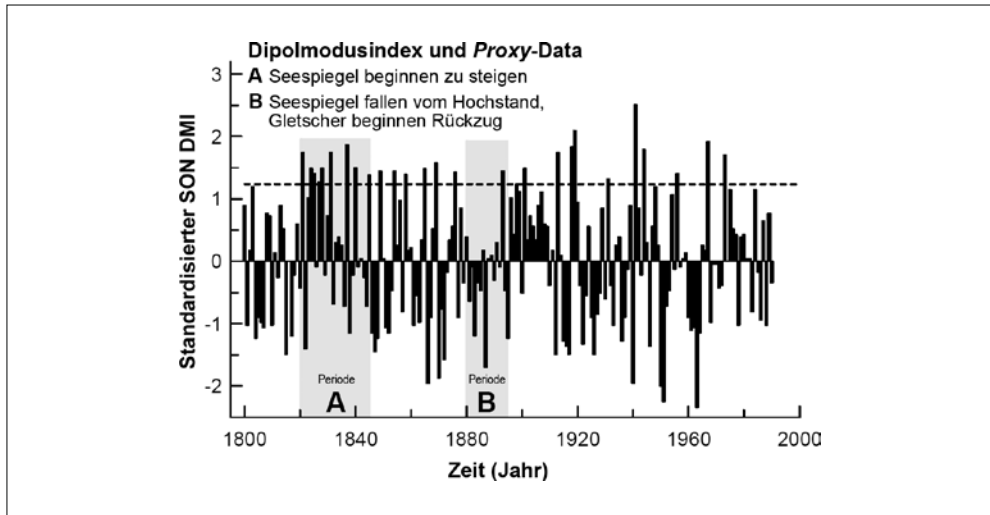


Abb. 4 Stärke des *Indian Ocean Zonal Mode* in einem globalen Klimamodell seit 1800. Wenn die Balken die gestrichelte Linie übertreffen, zeigt dies einen starken Event mit überdurchschnittlich viel Niederschlag in Ostafrika in der Feuchtzeit Oktober–Dezember an. Quelle: MÖLG et al. 2006, modifiziert.

massen den Kilimandscharo vor allem aus dem Osten, das Niederschlagsmaximum am Berg liegt jedoch am Südhang (z. B. HEMP 2006). *Zweitens* gelten Gebirge generell als Regenmacher, die Luftmassen zum Aufsteigen und Ausregnen zwingen (ROTUNNO und HOUZE 2007). Es liegt somit nicht auf der Hand, dass die Feuchte aus dem Indischen Ozean auch tatsächlich das Wetter am Berg beeinflusst. Ein entscheidender Baustein in den anfangs genannten Skalen fehlt noch: die regionale Wechselwirkung des Gebirges mit den anströmenden Luftmassen.

4. Regionale Strömung über dem Gebirge

Hochaufgelöste (mesoskalige) Atmosphärenmodelle bieten eine komplexe, aber hervorragende Möglichkeit, um die Modifikationen der Strömung durch ein Gebirge zu untersuchen. In einem ersten Schritt liefern sie oft wertvolle Einsichten in die Prozesse durch ein idealisiertes Setup (z. B. MAYR und GOHM 2000, ROTUNNO und HOUZE 2007). Im Fall Kilimandscharo verwendeten wir anfangs einfach einen Glockenberg mit den Dimensionen des echten Gebirges (Höhe ca. 6 km, 60 km Breite an der Basis) und setzten ihn als Gelände in die dreidimensionale Domäne des Atmosphärenmodells mit einem Kilometer horizontaler Auflösung (MÖLG et al. 2009b). Zudem wurden die den Kilimandscharo anströmenden Luftmassen mit Hilfe von Klimadaten in *trocken*, *normal* und *feucht* klassifiziert. Anschließend dienten die meteorologischen Bedingungen dieser Luftmassen als Input für das Atmosphärenmodell, das so die dreidimensionale Dynamik der Luft bei ihrer Interaktion mit dem Berg simulieren kann.

Ein erstes zentrales Ergebnis betrifft die Strömung um den Berg, welche in Abbildung 5 veranschaulicht ist. Die Luft kommt hier aus östlicher Richtung, was eine typische

Begebenheit für das Gebirge darstellt (CHAN et al. 2008, MÖLG et al. 2009b). Es lassen sich drei Punkte hervorheben. *Erstens*, auf der windzugewandten Seite schafft es die Luft nicht, über das Gebirge zu steigen, und wird daher abgelenkt, strömt um den Berg herum. *Zweitens* bilden sich im Lee des Berges in der Folge zwei Wirbel (in der Abb. 5 rot markiert), welche – *drittens* – am Südhang eine Rückströmung verursachen, die Feuchtigkeit hangaufwärts transportiert. Die Kombination aus einem sehr hohen Gebirge und zu wenig Instabilität der Luftmasse führt also dazu, dass die Luft *um* den Berg strömen muss und deshalb Konvergenz und maximaler Niederschlag am Gegenhang auftreten. Dies erklärt, weshalb trotz dominanter Anströmung aus östlicher Richtung (Quellgebiet Indischer Ozean) das Niederschlagsmaximum im Südsektor des Kilimandscharo beobachtet wird.

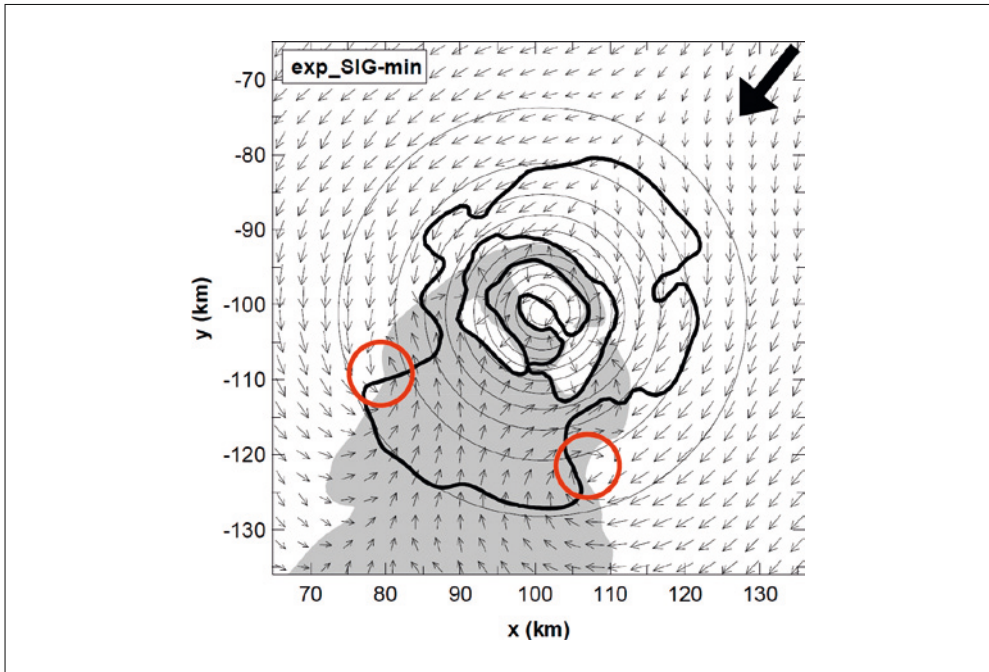


Abb. 5 Mesoskalige Zirkulation über dem Kilimandscharo in einem Atmosphärenmodell: Windvektoren 10 m über Grund, Zone mit einer südlichen meridionalen Windkomponente (schattiert) und Aufwindzonen (durch dicke Linien eingegrenzt). Der große Pfeil zeigt die Anströmungsrichtung der großräumigen Luftmasse, rote Kreise markieren im Text diskutierte Zonen. Das Gelände des Glockenberges ist als Höhenlinien konzentrischer Kreise zu sehen, von 700 m (äußerster Kreis) bis 5700 m (innerster Kreis) mit einer Äquidistanz von 500 m. Quelle: MÖLG et al. 2009b, modifiziert.

Bezüglich der zweiten Fragestellung (Gebirge als „Regenmacher“) zeigten die Simulationen, dass sowohl feuchte als auch trocken klassifizierte Luftmassen vom Berg hinreichend modifiziert werden, um Niederschlag über dem Gebirge zu produzieren. Der entscheidende Unterschied liegt jedoch darin, dass die Wolkenbildung bei Anströmung trockener Luftmassen unterhalb des Gipfels endet (z. B. Abb. 1). Der Gipfelbereich mit seinen Gletschern bleibt somit komplett trocken und sonnig, während es an den Hängen zwei bis drei Kilo-

meter unterhalb regnet. Details zu diesen Wolkenbildungsprozessen sind in MÖLG et al. (2009b) zu finden. Hauptgrund für die „gebremste“ Wolkenbildung in der Höhe bei trockenen Luftmassen ist eine thermodynamisch stabile Schicht in der Anströmung in ca. 2500 m Höhe (zwischen 800 und 700 hPa Luftdruck), die das Aufsteigen der Luft unterbindet. Solche Situationen sind in den letzten 30 Jahren immer häufiger geworden (MÖLG et al. 2009b), was den gegenwärtigen Mangel an Schneefall am Gipfel aus Sicht der regionalen Klimaskala untermauert.

Es ist also erst die Kenntnis der mesoskaligen Strömung, die unsere Lücke im Verständnis zwischen kontinentalen und lokalen Prozessen im Klimasystem schließt. Dies ist eine universell bedeutende Betrachtung und gilt besonders für Lebensräume in Gebirgen, die für die atmosphärische Strömung immer eine Barriere und daher Modifikationskraft bedeuten. In vom Relief stark gegliederten Regionen kann daher das direkte Übertragen der Eigenschaften des großräumigen Klimawandels zu falschen Interpretationen führen.

5. Schlussbemerkungen

All die Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten zeigen, dass das Klima ein hochgradig verzweigtes System ist – ein Aspekt, der in keiner Diskussion über den Klimawandel vergessen werden darf. Eine bildhafte Analogie bietet vielleicht die stark verzweigte Krone eines Baumes. Ändert man den Grundzustand des Systems – das wäre beim Baum ein Umpflanzen in einen anderen Topf, beim Klima ist es die globale Erwärmung –, wird sich diese Änderung über komplexe Mechanismen bis in die Spitzen fortpflanzen. Beim Klima bedeutet dies, dass sich nicht zwanghaft jeder Winkel des Planeten erwärmen muss, genauso gut können sich Niederschlagszonen verschieben, Windsysteme und Meeresströmungen sich ändern. Die drei Letztgenannten können für die Bewohner einer bestimmten Region genauso wichtig (oder wichtiger) sein als die potenzielle lokale und regionale Erwärmung selbst.

In unserem Beispiel haben wir gesehen (Abb. 6), dass weniger Feuchtezufuhr aus dem Indischen Ozean im 20. Jahrhundert die Stabilität der Luftmassen in Ostafrika erhöht hat, was Wolken- und Niederschlagsbildung am Kilimandscharo erschwert. Daher schrumpfen die niederschlagsempfindlichen Gletscher am Gipfel des Berges bis heute (z. B. CULLEN et al. 2013). Großräumiger Feuchtetransport hängt wiederum am globalen Zustand des Klimas, denn jede globale Erwärmung kontrolliert die Zirkulation in und über den tropischen Ozeanen maßgeblich (z. B. VECCHI und SODEN 2007). Dies lässt wenig Zweifel, dass der anthropogene Einfluss auf den Wasserdampftransport der Tropen im 21. Jahrhundert zunehmen wird. Bei Verknüpfungen wie diesen muss nochmals erwähnt werden, dass die Kenntnis skalenübergreifender Zusammenhänge (z. B. MÖLG und KASER 2011) entscheidend ist, denn letztlich ist es die lokale und regionale Größenordnung, auf der ein Großteil der Anpassung des Menschen an den Klimawandel erfolgen muss. Im Kontext von Gebirgen weist dies unumgänglich zum Thema der Wasserreserven, die ihren Ursprung oftmals in den Bergen und dortigen Gletschern und Schneedecken haben. Dies gilt sicher nicht für das Fallbeispiel Kilimandscharo, sehr wohl aber für weitflächig vergletscherte Regionen wie die Alpen oder Südamerika (z. B. JUEN et al. 2007, HUSS 2011).



Abb. 6 Illustration der Fortpflanzung großräumiger Klimaeffekte auf die lokale Skala am Beispiel der Kilimandscharo-Gletscher. Die Dynamik im Indischen Ozean (*rechts*) steuert den Transport der Luftmassen nach Ostafrika, deren Feuchtigkeitsgehalt einen entscheidenden Einfluss auf (*Mitte*) die mesoskalige Zirkulation über dem Gebirge hat (hier Blockierung der Bewölkung unterhalb des Gipfels), welche wiederum die Rahmenbedingung für (*links*) das Mikroklima direkt über den Gletschern vorgibt. Quelle: MÖLG 2008, modifiziert.

Die Klimaforschung bedient sich heute hochmoderner Supercomputer und Datenzentren, um die dreidimensionalen Zusammenhänge im Raum und deren zeitliche Variabilität aufzuspüren. Nur so können wir zu einem fundierten Verstehen der Funktionsweise des Klimas gelangen. Die Ursprünge dieser Betrachtung gehen jedoch viel weiter zurück, mindestens bis um 500 v. Chr., als HERAKLIT sagte: „Alles fließt.“ – und damit auf das ständige Werden in der Natur und deren hohe Dynamik anspielte. Diese Dynamik ist auch den Komponenten des Klimas gegeben, und zwar zu jeder Zeit. Sie alle sind in einem ständigen Fluss der Variabilität, und ebenso beständig interagieren sie miteinander.

Dank

Das Klimaprojekt Kilimandscharo wurde vor allem durch den österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung (FWF) finanziert. Seit 2011 werden meine Forschungen an der TU Berlin von der Alexander von Humboldt-Stiftung gefördert. Die vorgestellten Ergebnisse konnten nur durch die erfolgreiche Teamarbeit zustande kommen: Nicolas J. CULLEN, Douglas R. HARDY, Georg KASER und Michael WINKLER. Tansanische Behörden erteilten die Genehmigungen für die Feldarbeit. Meinen allergrößten Dank richte ich an dieser Stelle an die Leopoldina und die Commerzbankstiftung für die Verleihung des *Early Career Award*, in deren Rahmen ich den Vortrag halten durfte, der sich in diesem Artikel widerspiegelt. Herrn Prof. Dr. Tilman MÄRK, Rektor der Universität Innsbruck, verdanke ich meine Nominierung.

Literatur

- ABRAM, N. J., GAGAN, M. K., COLE, J. E., HANTORO, W. S., and MUDELSEE, M.: Recent intensification of climate variability in the Indian Ocean. *Nature Geosci.* 1, 849–853 (2008)
- AUER, I., BÖHM, R., JURKOVIC, A., LIPA, W., ORLIK, A., POTZMANN, R., SCHÖNER, W., UNGERSBÖCK, M., MATULLA, C., BRIFFA, K., JONES, P. D., EFTHYMIADIS, D., BRUNETTI, M., NANNI, T., MAUGERI, M., MERCALLI, L., MESTRE, O., MOISSELIN, J.-M., BEGERT, M., MÜLLER-WESTERMEIER, G., KVETON, V., BOCHNICEK, O., STASTNY, P., LAPIN, M., SZALAI, S., SZENTIMREY, T., CEGNAR, T., DOLINAR, M., GAJIC-CAPKA, M., ZANINOVIC, K., MAJSTOROVIC, Z., and NIEPLOVA, E.: HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760–2003. *Int. J. Climatol.* 27, 17–46 (2007)

- CHAN, R. Y., VUILLE, M., HARDY, D. R., and BRADLEY, R. S.: Intraseasonal precipitation variability on Kilimanjaro and the East African region and its relationship to the large-scale circulation. *Theoret. Appl. Climatol.* *93*, 149–165 (2008)
- CULLEN, N. J., MÖLG, T., KASER, G., STEFFEN, K., and HARDY, D. R.: Energy-balance model validation on the top of Kilimanjaro, Tanzania, using eddy covariance data. *Ann. Glaciol.* *46*, 227–233 (2007)
- CULLEN, N. J., SIRGUEY, P., MÖLG, T., KASER, G., WINKLER, M., and FITZSIMONS, S. J.: A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded. *The Cryosphere* *7*, 419–431 (2013)
- HASTENRATH, S.: Variations of East African climate during the past two centuries. *Clim. Change* *50*, 209–217 (2001)
- HEMP, A.: Vegetation of Kilimanjaro: hidden endemics and missing bamboo. *African J. Ecol.* *44*, 305–328 (2006)
- HUSS, M.: Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resour. Res.* *47*, W07511, doi:10.1029/2010WR010299 (2011)
- INDEJE, M., SEMAZZI, F. H. M., and OGALLO, L. J.: ENSO signals in East African rainfall. *Int. J. Climatol.* *20*, 19–46 (2000)
- JUEN, I., KASER, G., and GEORGES, C.: Modelling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global Planet. Change* *59*, 37–48 (2007)
- KASER, G., COGLEY, J. G., DYURGEROV, M. B., MEIER, M. F., and OHMURA, A.: Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961–2004. *Geophys. Res. Lett.* *33*, L19501, doi:10.1029/2006GL027511 (2006)
- KASER, G., and OSMASTON, H.: *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press: Cambridge 2002
- KLOK, E. J., and OERLEMANS, J.: Model study of the spatial distribution of the energy and mass balance of Morteratschgletscher, Switzerland. *J. Glaciol.* *48*, 505–518 (2002)
- KUIPERS MUNNEKE, P., VAN DEN BROEKE, M. R., REIJMER, C. H., HELSEN, M. M., BOOT, W., SCHNEEBELI, M., and STEFFEN, K.: The role of radiation penetration in the energy budget of the snowpack at Summit, Greenland. *The Cryosphere* *3*, 155–165 (2009)
- MAYR, G. J., and GOHM, A.: 2-D airflow over a double bell-shaped mountain. *Meteorol. Atmos. Phys.* *72*, 13–27 (2000)
- MEYER, H.: Zur Kenntnis von Eis und Schnee des Kilimandscharo. *Petermanns Geogr. Mitt.* *36*, 289–294 (1891)
- MÖLG, T.: Climate change in the tropics derived from glacier-atmosphere interactions. Habilitation thesis, University of Innsbruck: Innsbruck (2008)
- MÖLG, T., CHIANG, J. C. H., GOHM, A., and CULLEN, N. J.: Temporal precipitation variability versus altitude on a tropical high mountain: Observations and mesoscale atmospheric modeling. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* *135*, 1439–1455 (2009b)
- MÖLG, T., CULLEN, N. J., HARDY, D. R., KASER, G., and KLOK, L.: Mass balance of a slope glacier on Kilimanjaro and its sensitivity to climate. *Int. J. Climatol.* *28*, 881–892 (2008)
- MÖLG, T., CULLEN, N. J., HARDY, D. R., WINKLER, M., and KASER, G.: Quantifying climate change in the tropical midtroposphere over East Africa from glacier shrinkage on Kilimanjaro. *J. Clim.* *22*, 4162–4181 (2009a)
- MÖLG, T., and HARDY, D. R.: Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. *J. Geophys. Res.* *109*, D16104, doi:10.1029/2003JD003546 (2004)
- MÖLG, T., and KASER, G.: A new approach to resolving climate-cryosphere relations: Downscaling climate dynamics to glacier-scale mass and energy balance without statistical scale linking. *J. Geophys. Res.* *116*, D16101, doi: 10.1029/2011JD015669 (2011)
- MÖLG, T., MAUSSON, F., YANG, W., and SCHERER, D.: The footprint of Asian monsoon dynamics in the mass and energy balance of a Tibetan glacier. *The Cryosphere* *6*, 1445–1461 (2012)
- MÖLG, T., RENOLD, M., VUILLE, M., CULLEN, N. J., STOCKER, T. F., and KASER, G.: Indian Ocean Zonal Mode activity in a multicentury integration of a coupled AOGCM consistent with climate proxy data. *Geophys. Res. Lett.* *33*, L18710, doi:10.1029/2006GL026384 (2006)
- NAKAMURA, N., KAYANNE, H., IJINA, H., McCLANAHAN, T. R., BEHERA, S. K., and YAMAGATA, T.: Mode shift in the Indian Ocean climate under global warming stress. *Geophys. Res. Lett.* *36*, L23708, doi:10.1029/2009GL040590 (2009)
- NICHOLSON, S. E., and YIN, X.: Rainfall conditions in Equatorial East Africa during the nineteenth century as inferred from the record of Lake Victoria. *Clim. Change* *48*, 387–398 (2001)
- ROTUNNO, R., and HOUZE, R. A.: Lessons on orographic precipitation from the Mesoscale Alpine Programme. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* *133*, 811–830 (2007)
- SAJI, N. H., GOSWAMI, B. N., VINAYACHANDRAN, P. N., and YAMAGATA, T.: A dipolemode in the tropical Indian Ocean. *Nature* *401*, 360–363 (1999)

Spuren des Klimawandels: Von den großen Ozeanen zu den kleinen Gletschern

- VAN DEN BROEKE, M., FETTWEIS, X., and MÖLG, T.: Surface energy balance. In: SINGH, V. P., SINGH, P., and HARI-TASHYA, U. K. (Eds.): *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*; pp. 1112–1122. Berlin: Springer 2011
- VECCHI, G. A., and SODEN, B. J.: Global warming and the weakening of the tropical circulation. *J. Clim.* 20, 4316–4340 (2007)
- WEBSTER, P. J., MOORE, A. M., LOSCHNIGG, J. P., and LEBEN, R. R.: Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98. *Nature* 401, 356–360 (1999)

Thomas MÖLG
Humboldt-Stipendiat
Fachgebiet Klimatologie
Technische Universität Berlin
Rothenburgstraße 12
12165 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 31471330
Fax: +49 30 31471355
E-Mail: thomas.moelg@campus.tu-berlin.de

Der Klimawandel und seine Folgen für das Erdsystem

Stefan RAHMSTORF (Potsdam)

Mit 6 Abbildungen



Zusammenfassung

Seit Beginn der Industrialisierung ist der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre auf den bei weitem höchsten Wert seit rund einer Million Jahre angestiegen. Gleichzeitig stieg die mittlere Oberflächentemperatur der Erde um 0,8 Grad. Die Erwärmung schreitet bislang ungebremst fort. Das Jahr 2010 war das global wärmste oder zweitwärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen vor mehr als 130 Jahren. Die Eisdecke auf dem arktischen Ozean schwindet immer weiter und hat im September 2012 ein neues Rekordminimum erreicht. Der Meeresspiegel steigt immer rascher an: zu Anfang des 20. Jahrhunderts um rund 1 cm pro Jahrzehnt, in den letzten zwanzig Jahren schon um mehr als 3 cm pro Jahrzehnt. Die letzte Dekade hat eine Häufung nie dagewesener Wetterextreme erlebt. Datenanalysen zeigen, dass die Anzahl der monatlichen Wärmerekorde bereits 5-mal höher ist als in einem stationären Klima. Die Zukunft des Erdklimas hängt hauptsächlich von den anthropogenen Emissionen ab; nur bei bald rasch sinkenden globalen Emissionen kann die 2-Grad-Leitplanke, das Ziel der globalen Klimapolitik, noch eingehalten werden.

Abstract

Since the start of the industrial age, the carbon dioxide content of the atmosphere has risen to the by far highest value of the last million years. At the same time, global average surface temperatures have increased by 0.8 °C. This warming is continuing unabated: 2010 was the hottest or second-hottest year on record since global measurements began more than 130 years ago. The ice cover on the Arctic Ocean is shrinking rapidly and has reached a record low value in September 2012. Sea levels are rising ever faster: they rose at a rate of 1 cm per decade at the beginning of the 20th Century, but already at over 3 cm per decade over the past twenty years. The last decade has witnessed a sequence of unprecedented weather extremes. Data analysis shows that the number of record-warm months is now five times higher than in a stationary climate. The future of climate on Earth will depend mainly on anthropogenic emissions. Only if emissions start to decline soon and rapidly can the global climate policy goal of keeping global warming below the 2-degree-guardrail still be reached.

1. Die Energiebilanz unserer Erde

Das Klima unserer Erde und insbesondere die global gemittelte oberflächennahe Temperatur sind das Ergebnis einer Energiebilanz (PIERREHUMBERT 2011). Die globale Temperatur wird vom 1. Hauptsatz der Thermodynamik bestimmt, dem Satz von der Energieerhaltung. Die Energie, die das Klimasystem antreibt, kommt von der Sonne. Rund 30% der ankommenden Sonnenstrahlung wird gleich reflektiert, am stärksten durch helle Flächen wie Wolken oder Schnee- und Eisflächen. Der Rest, das sind 242 W pro Quadratmeter Erdoberfläche, wird in der Atmosphäre, am Boden oder im oberen Ozean absorbiert (IPCC 2007).

Die Erde strahlt – wie jeder physikalische Körper – Energie ab, und zwar umso mehr, je wärmer sie ist. Die globale Temperatur stellt sich deshalb gerade so ein, dass ebenso viel Energie abgestrahlt wie absorbiert wird. Ein exaktes Gleichgewicht entspricht einem stabilen Klima. Wird mehr Energie aufgenommen als abgestrahlt, erwärmt sich das Klima. Das derzeitige Ungleichgewicht im Zusammenhang mit der aktuellen globalen Erwärmung beträgt rund 1 W/m² (HANSEN et al. 2005). Die netto aufgenommene Energie wird zum allergrößten Teil dafür verwendet, die Ozeane mit ihrer großen Wärmespeicherkapazität aufzuheizen.

2. Etwas Geschichte

Die Energiebilanz von Planeten und ihre bestimmende Rolle für die Temperatur wurde erstmals von Joseph FOURIER im Jahr 1827 verstanden (FOURIER 1827). FOURIER war auch der Erste, der dabei die Bedeutung des Treibhauseffekts beschrieben hat. Bei einer für Wärmestrahlung vollkommen transparenten Atmosphäre wäre unsere Erde drastisch kälter (die Oberflächentemperatur läge bei –18 °C, wenn ansonsten alles gleich bliebe). Da die Lufthülle unseres Planeten aber im Infraroten nicht transparent ist, wird die Wärmestrahlung von der Oberfläche auf dem Weg ins All zum großen Teil absorbiert und in alle Richtungen wieder emittiert, auch zur Oberfläche zurück, sodass die Erdoberfläche dadurch zusätzlich beheizt wird (PIERREHUMBERT 2011). Die Heizleistung dieser Rückstrahlung ist mit 324 W/m² sogar wesentlich größer als die absorbierte Sonnenstrahlung; dadurch beträgt die mittlere globale Temperatur rund +15 °C (IPCC 2007). Der Treibhauseffekt macht unsere Erde erst zu einem lebensfreundlichen Planeten.

Alexander VON HUMBOLDT wies als einer der Ersten darauf hin, dass der Mensch das Klima verändert. Im Jahr 1844 schrieb er, der Mensch verändere das Klima „durch Fällen der Wälder [...] und durch die Entwicklung großer Dampf- und Gasmassen an den Mittelpunkten der Industrie“ (VON HUMBOLDT 1844).

HUMBOLDT konnte allerdings damals noch nicht wissen, welche Gase derart klimawirksam sind, denn erst im Jahr 1859 belegte der Physiker John TYNDALL durch Labormessungen, welche Gase den Treibhauseffekt verursachen. Zugleich hat er eine wunderbar knappe Beschreibung des Treibhauseffekts zu Papier gebracht: „The atmosphere admits of the entrance of solar heat, but checks its exit; and the result is a tendency to accumulate heat at the surface of the planet.“ (TYNDALL 1859.)

TYNDALL stellte damals fest, dass zu den Treibhausgasen u. a. Kohlendioxid (CO₂) gehört, dessen starker Anstieg in der Atmosphäre uns heute beschäftigt (Abb. 1). Dabei steht

zweifelsfrei fest, dass dieser Anstieg vom Menschen verursacht ist. Dies zeigt nicht nur die Isotopenzusammensetzung, die den fossilen Ursprung des zusätzlichen Kohlenstoffs belegt (BOLIN und ERIKSSON 1958, REVELLE und SUESS 1957), sondern ebenso eine simple Bilanzrechnung. Die beobachtete Zunahme in der Atmosphäre entspricht mengenmäßig nur rund der Hälfte des CO_2 fossilen Ursprungs, das wir aus unseren Auspuffen und Schornsteinen in die Atmosphäre entlassen haben. Es kann also keine Rede davon sein, dass das CO_2 etwa einer natürlichen Quelle (wie Vulkanen oder dem Ozean) entstammt, sondern das natürliche Erdsystem hat sogar die Hälfte unseres industriellen CO_2 aus der Atmosphäre aufgenommen.

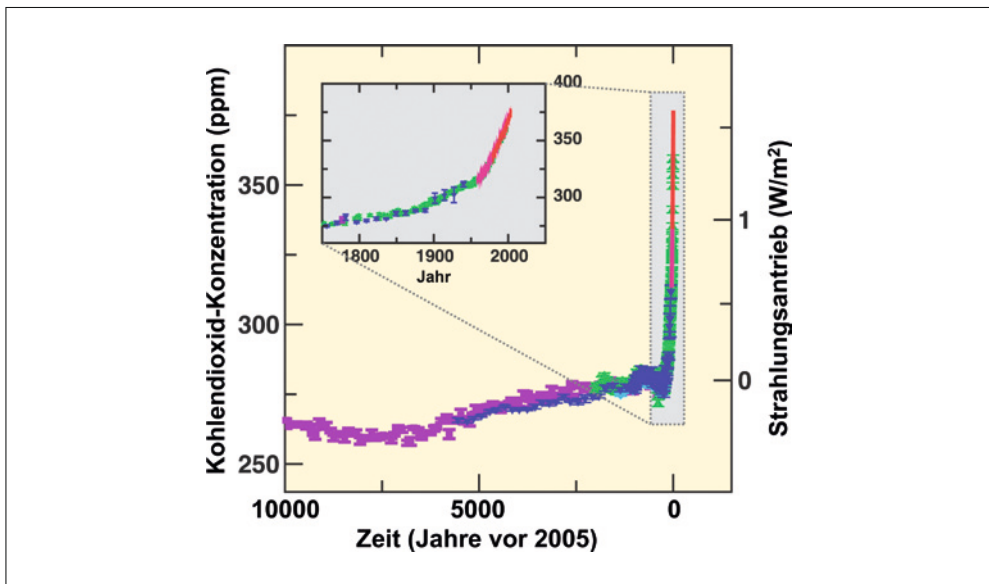


Abb. 1 Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre über die letzten 10 000 Jahre. Die beiden Linien zeigen direkte atmosphärische Messungen (seit Ende der 1950er Jahre), die Symbole Daten aus antarktischen Eisbohrkernen. Quelle: IPCC 2007, modifiziert.

Messungen zeigen, dass der größte Teil des aus der Atmosphäre verschwundenen fossilen Kohlenstoffs in den Ozeanen gelandet ist. Auch dort steigt die CO_2 -Konzentration an. Dies ist die Ursache der zunehmenden Meeresversauerung, da CO_2 in Wasser Kohlensäure bildet. Diese Versauerung gefährdet das Leben im Meer (ORR et al. 2005) und wäre alleine Grund genug, so rasch wie möglich unsere CO_2 -Emissionen einzustellen. In diesem Beitrag soll dieses Problem – trotz seiner großen Bedeutung – nicht weiter behandelt werden, weil wir uns auf die Klimawirkung der steigenden CO_2 -Mengen in der Atmosphäre konzentrieren. Die CO_2 -Konzentration ist heute bereits rund ein Drittel höher, als sie jemals in den vergangenen 800 000 Jahren gewesen ist, wie man aus Eisbohrungen in der Antarktis weiß (LÜTHI et al. 2008, SIEGENTHALER et al. 2005).

3. Die globale Erwärmung

Die geschilderte planetare Energiebilanz zeigt, dass es grundsätzlich nur drei Möglichkeiten gibt, die globale Temperatur spürbar zu verändern: Dazu muss entweder *erstens* die ankommende Sonnenstrahlung oder *zweitens* deren reflektierter Anteil sich verändern, oder es muss *drittens* in die abgehende Wärmestrahlung eingegriffen werden. Alle drei Möglichkeiten haben bei natürlichen Klimaveränderungen in der Erdgeschichte eine Rolle gespielt, zum Beispiel bei den bekannten Eiszeitzyklen (RUDDIMAN 2000). Solche früheren natürlichen Klimaänderungen werden von Klimaforschern (u. a. in unserer Arbeitsgruppe) genutzt, um zu untersuchen, wie empfindlich das Klimasystem auf eine bestimmte Störung in der planetaren Energiebilanz reagiert (SCHNEIDER VON DEIMLING et al. 2006a). Eine aktuelle Zusammenstellung zahlreicher derartiger Studien zeigt, dass eine Verdoppelung der CO₂-Konzentration einer globalen Erwärmung zwischen 2,2 und 4,8 Grad entspricht (ROHLING et al. 2012). Diese Erwärmung, die sich infolge einer CO₂-Verdoppelung einstellt (nach einigen Jahrzehnten, da es eine Zeit dauert, bis die Ozeane sich erwärmt haben), ist als Klimasensitivität bekannt. Die erste Bestimmung der Klimasensitivität wurde schon im 19. Jahrhundert durch den späteren Nobelpreisträger Svante ARRHENIUS veröffentlicht (ARRHENIUS 1896); er kam damals auf (nach heutigem Kenntnisstand etwas zu hohe) 4–6 Grad. Die aktuell besten Abschätzungen mit Hilfe von Klimamodellen sind konsistent mit den oben genannten aus der Erdgeschichte ableitbaren Erfahrungswerten und liegen um die 3 Grad, mit einer Unsicherheit von ca. ± 1 Grad.

Kennt man die Klimasensitivität, so lässt sich leicht berechnen, wie stark die bislang vom Menschen verursachte Erwärmung sein sollte. Bei 3 Grad Klimasensitivität sind aufgrund unserer Emissionen (und unter Berücksichtigung der thermischen Trägheit der Ozeane) bis heute 0,7 bis 0,9 Grad Erwärmung zu erwarten (RAHMSTORF 2008). Dies entspricht auch der tatsächlichen gemessenen Erwärmung (Abb. 2). Das deutet bereits darauf hin, dass die anthropogenen Effekte dominant sind und natürliche Einflüsse auf die globale Mitteltemperatur offenbar eine untergeordnete Rolle spielen. Genauere Analysen bestätigen dies; so sind Veränderungen der Sonnenleuchtkraft in den letzten 50 Jahren eine Größenordnung kleiner als der anthropogene Strahlungsantrieb und würden überdies zu einer geringfügigen Abkühlung tendieren (Abb. 2).

Aus Sicht der gut verstandenen Strahlungsbilanz der Erde gibt es keinen Zweifel, dass der CO₂-Anstieg der dominante Grund der Erwärmung seit 1950 ist. Eine Reihe kleinerer Beiträge (weitere anthropogene Treibhausgase, kühlende Wirkung von Luftverschmutzung durch Aerosole) gleichen sich weitgehend gegenseitig aus, sodass die Gesamtstörung der Strahlungsbilanz gerade etwa so groß ist wie der Effekt des CO₂-Anstiegs alleine (IPCC 2007).

Dem langfristigen Erwärmungstrend sind kurzfristige Schwankungen überlagert, die u. a. von Vulkanausbrüchen, der El-Niño-Oszillation im Pazifik und Zyklen der Sonnenaktivität verursacht werden. Für diese drei Faktoren gibt es unabhängige Messreihen, sodass ihr Effekt mit einer üblichen Korrelationsanalyse aus den Temperaturdaten herausgerechnet werden kann. Im Ergebnis sieht man, dass es über diese normalen Schwankungen hinaus in den letzten drei Jahrzehnten keine nennenswerte Veränderung des Erwärmungstrends gegeben hat, weder eine Beschleunigung noch eine Verlangsamung (Abb. 3). Die Erwärmung entspricht zudem den Vorhersagen aus den beiden letzten IPCC-Berichten.

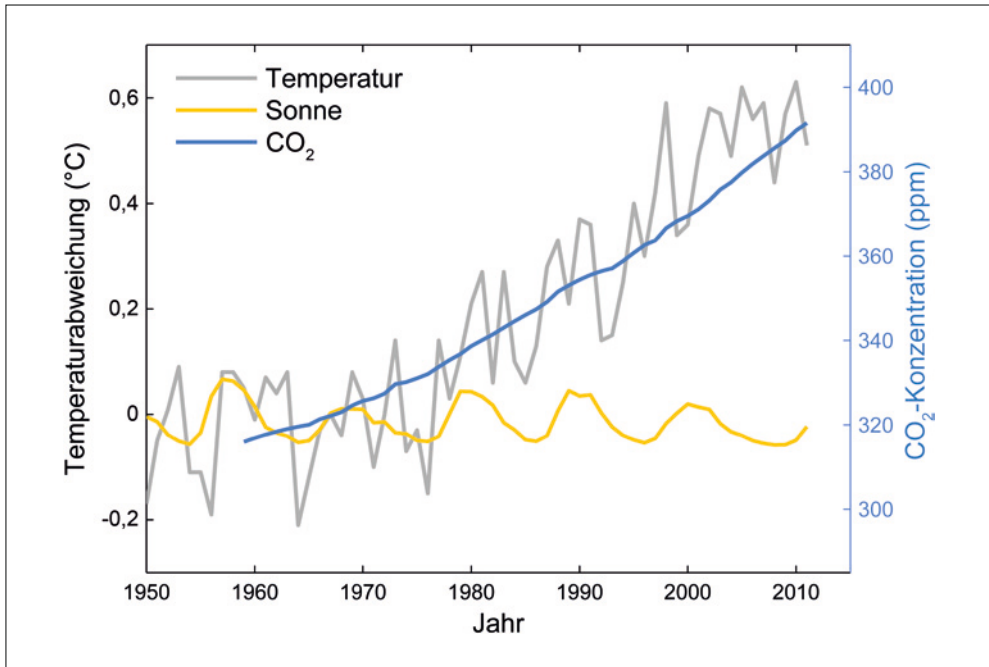


Abb. 2 Verlauf der globalen Temperatur (*grau*, Jahreswerte der NASA), der atmosphärischen CO₂-Konzentration (*blau*, Stationsdaten vom Mauna Loa, Hawaii) und der Sonnenfleckenanzahl (*gelb*). Die CO₂-Konzentration ist relativ zur Temperatur so skaliert, dass bei der physikalisch erwarteten klimatischen Wirkung des CO₂ beide Kurven die gleiche Steigung hätten. Das heißt, die Skalierung entspricht einer Klimasensitivität von 3 Grad unter Berücksichtigung der thermischen Trägheit, sodass die transiente Sensitivität (*Transient Climate Response TCR*) mit 2,1 Grad bei CO₂-Verdoppelung gerade der besten Abschätzung des IPCC entspricht (*IPCC 2007*). Die Sonnenfleckenkurve ist so skaliert, wie es sich aus einer Korrelationsanalyse zwischen Sonnenfleckenanzahl und globaler Temperatur ergibt (*FOSTER und RAHMSTORF 2011*). Andere Indikatoren der Sonnenaktivität (vor allem die Leuchtkraft der Sonne, die seit den 1970er Jahren von Satelliten gemessen wird) korrelieren stark mit der Sonnenfleckenanzahl und ergeben daher ein sehr ähnliches Bild.

Das Jahr 2010 war (je nach Datensatz) das wärmste oder zweitwärmste seit Beginn der Aufzeichnungen, obwohl es in das tiefste und längste Sonnenminimum seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970er Jahre fiel – ein weiteres Indiz für die geringe Rolle der Sonne, deren abnehmende Leuchtkraft in den letzten 50 Jahren der globalen Erwärmung nur leicht entgegengewirkt hat.

Zu den Symptomen der globalen Erwärmung gehört der weltweite Gletscherschwund (eine der wichtigsten Ursachen des modernen Meeresspiegelanstiegs [*CHURCH et al. 2011*]) ebenso wie der dramatische Rückgang der Sommer-Meereisdecke auf dem arktischen Ozean. Diese ist in den letzten 30 Jahren bereits um rund die Hälfte geschrumpft und hat 2012 ein neues Rekordtief erreicht (*National Snow and Ice Data Center 2012*). Somit ist die Erwärmung unseres Planeten auch bei einem Blick aus dem Weltall deutlich sichtbar.

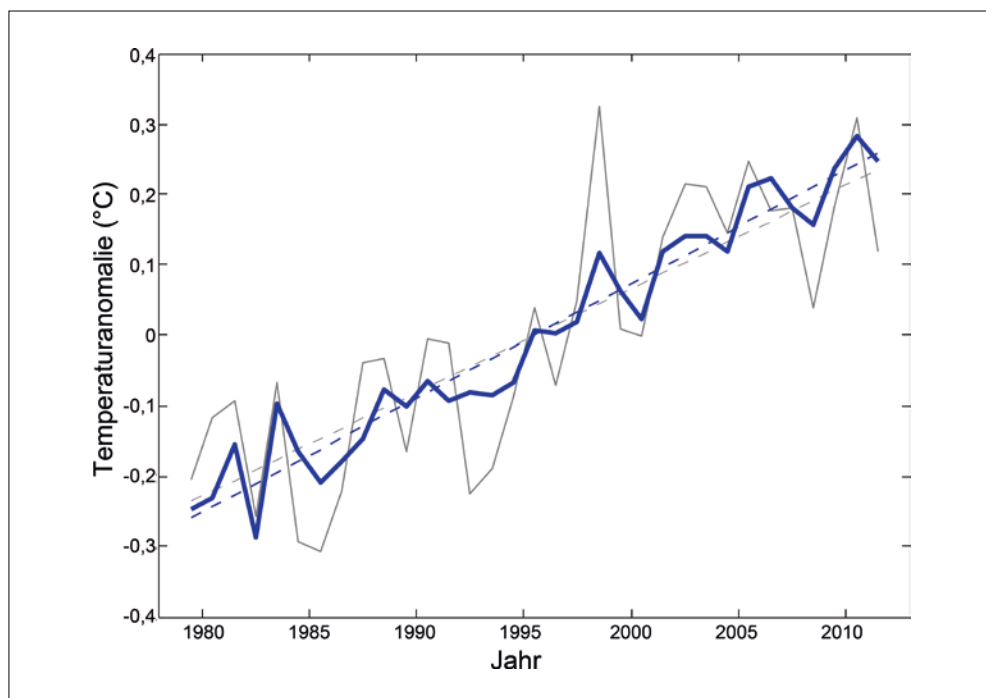


Abb. 3 Verlauf der globalen Temperatur (blau, Mittelwert aus den 5 verfügbaren globalen Datenreihen) nach Bereinigung um den Einfluss von Vulkaneruptionen, dem El-Niño-Southern-Oscillation-Zyklus (ENSO) und der Sonnenaktivität. Die unbereinigten Originaldaten sind grau hinterlegt. Nach FOSTER und RAHMSTORF 2011, modifiziert.

4. Ein Blick in die Zukunft

Da der Mensch inzwischen die Veränderungen der Strahlungsbilanz unseres Planeten stark dominiert, hängt die Zukunft des Erdklimas hauptsächlich von uns Menschen ab. Schwankungen der Sonnenaktivität reichen selbst bei extremen Annahmen („neues Maunder-Minimum“) nicht aus, die treibhausgasbedingte Erwärmung nennenswert zu verringern (FEULNER und RAHMSTORF 2010), und auch die mit astronomischer Präzision berechenbaren Erdbahnzyklen (die die Eiszeiten verursacht haben) werden die Erwärmung in absehbarer Zeit nicht stoppen: Erst in rund 50 000 Jahren kommt es dadurch zum nächsten starken Einstrahlungsminimum, das eine neue Eiszeit einläuten könnte (IPCC 2007). Verbrennen wir in den nächsten Jahrhunderten den größten Teil der Kohlevorräte der Erde, könnte dadurch sogar diese anstehende Eiszeit ausfallen, weil bis dahin die CO_2 -Konzentration immer noch deutlich erhöht wäre (ARCHER und GANOPOLSKI 2005).

Die anthropogenen Treibhausgasemissionen sind nicht vorhersagbar, daher betrachtet man eine ganze Reihe von Szenarien mit unterschiedlichen Annahmen. Drei Beispiele mit niedrigen, mittleren und hohen Emissionen sind in Abbildung 4 gezeigt – alle drei allerdings ohne eine erfolgreiche Klimaschutzpolitik anzunehmen (IPCC 2000). Bei vorgegebenen Emissionen kann die Klimawissenschaft die sich daraus ergebende globale Er-

wärmung (mit den gezeigten Unsicherheiten) berechnen, auf Basis der eingangs erläuterten Energiebilanz unserer Erde. Im optimistischsten der drei Szenarien würde die globale Temperatur im Jahr 2100 um 2–3 Grad über dem vorindustriellen Niveau liegen – im pessimistischsten gar um 4–7 Grad. Das entspricht gerade dem Temperaturunterschied zwischen dem Höhepunkt der letzten Eiszeit (vor 20 000 Jahren) und heute (SCHNEIDER VON DEIMLING et al. 2006b) – eine solche Erwärmung würde den Planeten völlig verändern.

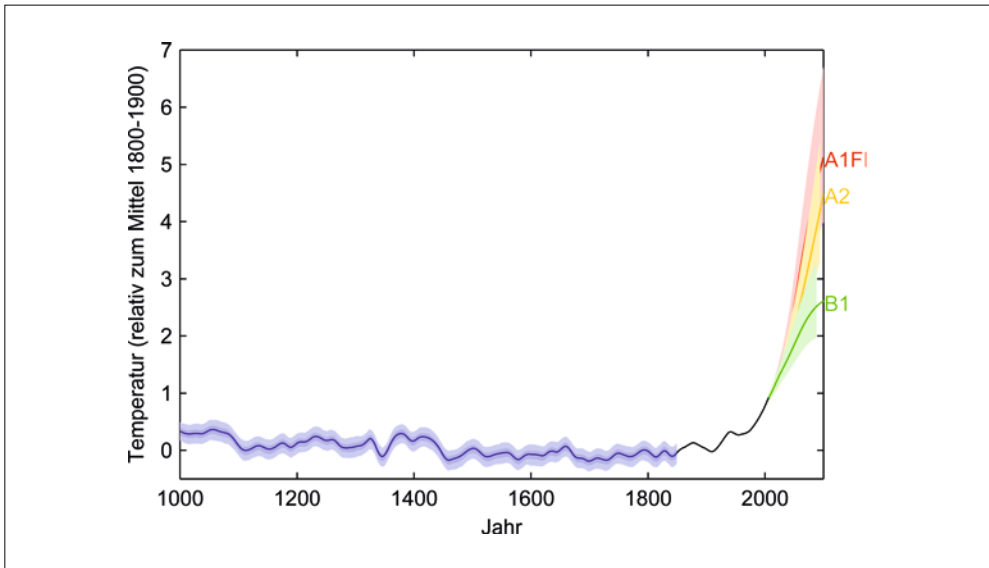


Abb. 4 Szenarien des IPCC (2007) zum Anstieg der globalen Temperatur im 21. Jahrhundert. Gezeigt sind die drei Emissionsszenarien B1, A2 und A1FI mit zugehörigen Unsicherheitsbereichen. Zum Vergleich die Temperaturen seit dem Mittelalter aus Proxydaten (MANN et al. 2008, mit Fehlermargen, blau) sowie die Messdaten ab 1860 (schwarz).

Die globale Erwärmung wird erhebliche regionale Unterschiede aufweisen. Vor allem erwärmen sich aus physikalischen Gründen Landmassen stärker als Meeresgebiete. Bei einer mittleren Erwärmung um 4 Grad würden sich viele Landgebiete um 6 Grad oder mehr aufheizen. Zudem werden sich die hohen nördlichen Breiten und viele Gebirgsregionen besonders stark erwärmen, aufgrund der Rückkopplung durch den Verlust der Schnee- und Eisbedeckung, die bislang durch die Reflektion von Sonnenstrahlung zur Kühlung beigetragen hat (Eis-Albedo-Feedback).

5. Extremereignisse

Für die Auswirkungen der globalen Erwärmung kommt es weniger auf die Durchschnittstemperaturen als auf die Extreme an. Insbesondere Hitzeextreme nehmen in einem wärmeren Klima natürlich zu. Manchen mag aber das Ausmaß überraschen. So ist bereits nach der bisherigen globalen Erwärmung um nur ca. 0,8 Grad die Häufigkeit monatlicher Hitzerekorde weltweit um das 5-fache gestiegen (Abb. 5).

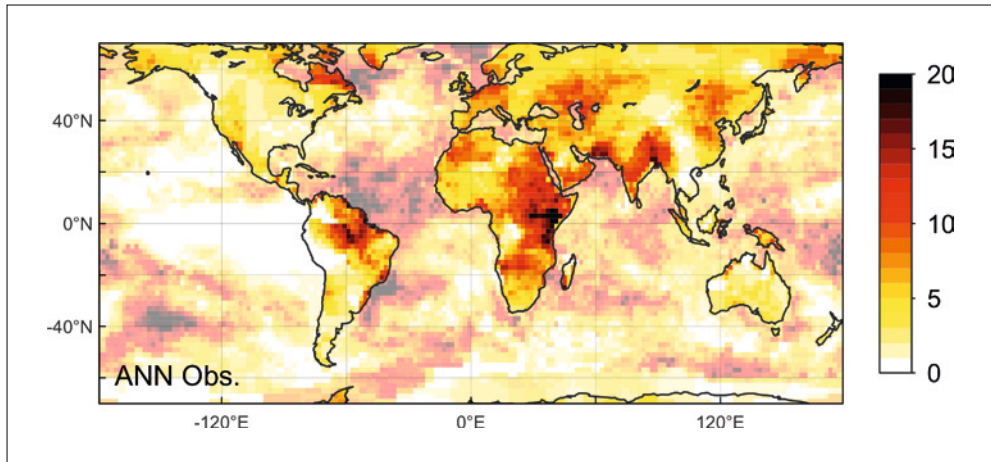


Abb. 5 Die Anzahl der gemessenen rekordwarmen Monate in den vergangenen zehn Jahren weltweit, dargestellt als Faktor, um den die gemessene Zahl den in einem stationären Klima erwarteten Wert übersteigt. Im globalen Mittel ist dieser Faktor 5, d. h., es wurden 5-mal so viele rekordwarme Monate beobachtet als ohne globale Erwärmung (nur durch Zufall) zu erwarten. Datenbasis sind die NASA-Daten 1880–2010. Quelle: COUMOU et al. 2013.

In den nächsten 30 Jahren wird ein Anstieg auf das 12-fache erwartet (COUMOU et al. 2013). Dabei werden nur echte neue Rekorde gezählt – ein Hitzerekord im Jahr 2040 muss dazu auch Rekorde aus den 2020er oder 2030er Jahren überbieten, die bereits wärmer sein werden als alles, was wir bislang erlebt haben. Derartige beispiellose Rekordhitzewellen gab es z. B. in Westeuropa 2003, Russland 2010, USA 2012 und Australien 2009 und 2013. Für den Jahrhundertsommer 2003 wurden für Europa rund 70 000 Hitzetote belegt (ROBINE et al. 2008). Außerdem sind solche Hitzewellen oft mit Dürre und Ernteausfällen verbunden, was über steigende Nahrungsmittelpreise sogar weltweite Auswirkungen haben kann.

Auch andere Arten von Extremereignissen nehmen infolge der globalen Erwärmung zu (COUMOU und RAHMSTORF 2012). Für Niederschläge und Sturmereignisse ist dies aus verschiedenen Gründen durch Messdaten schwerer zu belegen. Es gibt aber gute physikalische Gründe, weshalb in einem wärmeren Klima sowohl häufigere und stärkere Dürren als auch mehr Extremniederschläge zu erwarten sind. Während über die Entwicklung von Sturmstärken noch intensiv diskutiert wird, ist zumindest klar, dass die Überschwemmungen durch Sturmfluten an den Küsten (als Beispiel sei die Überflutung in New York infolge des Hurrikans „Sandy“ im Oktober 2012 genannt) schon allein deshalb zunehmen werden, weil durch die globale Erwärmung der Meeresspiegel ansteigt.

6. Anstieg des Meeresspiegels

Ein wärmeres Klima zieht zwangsläufig einen steigenden Meeresspiegel nach sich, da das Meerwasser sich bei Erwärmung ausdehnt und Landeismassen schrumpfen, wodurch zusätzliches Wasser in die Meere gelangt. Seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist der globale

Meeresspiegel um rund 20 cm angestiegen (Abb. 6). Die Anstiegsrate ist dabei proportional zur Temperaturerhöhung angewachsen (RAHMSTORF 2007). Auch an den deutschen Küsten steigt nicht nur der Meeresspiegel, sondern die Anstiegsrate nimmt ebenfalls zu (WAHL et al. 2011).

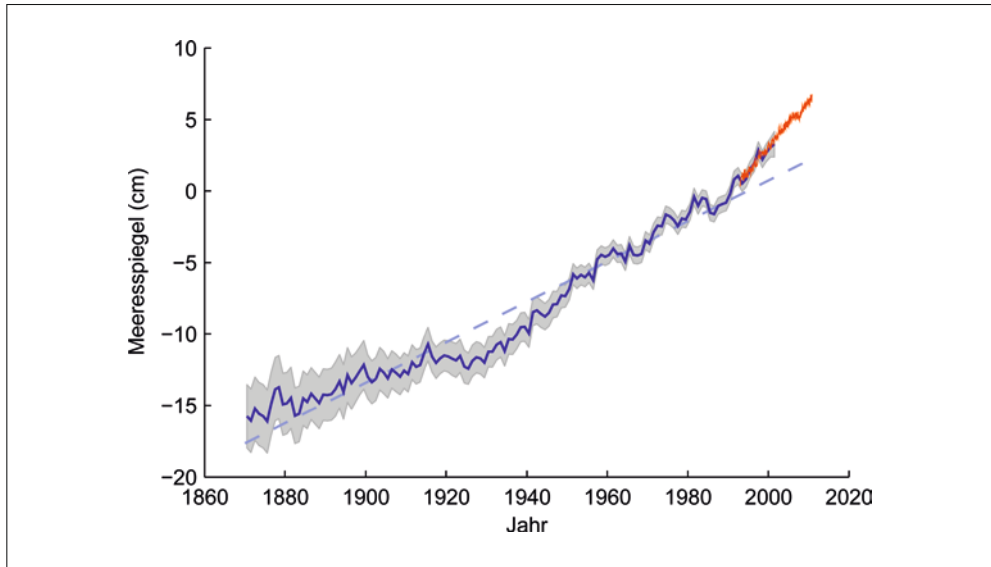


Abb. 6 Globaler Anstieg des Meeresspiegels auf Basis von Pegelmessungen (blau) seit 1870 (CHURCH und WHITE 2006) und Satellitenmessungen (rot) seit 1993 (Centre Nationale d'Etudes Spatiales).

In einem laufenden Projekt mit US-amerikanischen Kollegen rekonstruieren wir den Meeresspiegel der vergangenen 2000 Jahre aus Ablagerungen in Salzmarschen an der Küste. Die Ergebnisse legen nahe, dass der Anstieg im 20. Jahrhundert mindestens dreimal so rasch verläuft wie in allen früheren Jahrhunderten seit Beginn unserer Zeitrechnung (KEMP et al. 2011).

Der beobachtete Zusammenhang zwischen globaler Temperatur und Anstiegsrate des Meeresspiegels ermöglicht mit der sogenannten semi-empirischen Methode auch eine Abschätzung der künftigen Meeresspiegelentwicklung, für ein vorgegebenes Szenario des globalen Temperaturanstiegs (VERMEER und RAHMSTORF 2009). Dies legt einen deutlich rascheren Anstieg nahe, als er noch im letzten IPCC-Bericht aus dem Jahr 2007 erwartet wurde. Die aktuellsten verfügbaren Meeresspiegelszenarien wurden von der US-amerikanischen Ozean- und Atmosphärenbehörde NOAA für den nationalen Klimabericht der USA erstellt (PARRIS et al. 2012). Sie gehen von einem wahrscheinlichen Anstieg im Bereich 0,5 bis 1,2 m bis 2100 aus, mit einer Untergrenze von 0,2 m und einer Obergrenze von 2 m.

Die breite Spanne illustriert die große Unsicherheit, die aus der Unsicherheit über die künftigen Emissionen, der Unsicherheit der Temperaturentwicklung bei gegebenen Emissionen und der Unsicherheit des Meeresspiegelanstiegs bei bekanntem Temperaturverlauf resultiert. Der mittlere Bereich von 0,5 bis 1,2 m entspricht dabei fast genau der ersten

semi-empirischen Abschätzung (RAHMSTORF 2007), während der untere Bereich zwischen 0,2 und 0,5 m etwa den Projektionen des 4. IPCC-Berichts entspricht (IPCC 2007). Jenseits des Jahres 2100 ist für viele Jahrhunderte ein weiterer Meeresspiegelanstieg zu erwarten, selbst wenn der Temperaturanstieg schon lange gestoppt wurde. Bis zum Jahr 2300 muss mit mehreren Metern globalem Meeresspiegelanstieg gerechnet werden (SCHAEFFER et al. 2012, WBGU 2006), was die Existenz zahlreicher Küstenstädte und ganzer Inselstaaten gefährdet.

7. Schlussbemerkung

Nur umgehend eingeleitete Klimaschutzmaßnahmen, die den Ausstoß von Klimagasen weltweit rasch senken, können die globale Erwärmung noch unterhalb von 2 Grad (im Vergleich zum vorindustriellen Temperaturniveau) halten (MEINSHAUSEN et al. 2009, WBGU 2009). Dies ist seit dem UNO-Klimagipfel von Cancún 2010 das von praktisch allen Staaten akzeptierte Ziel der globalen Klimapolitik. Dabei wird selbst eine Erwärmung um „nur“ 2 Grad gravierende Folgen haben und große Anpassungsanstrengungen erfordern, wie die oben kurz skizzierten Auswirkungen der bisherigen globalen Erwärmung um nur 0,8 Grad bereits nahelegen. Jenseits der 2-Grad-Leitplanke werden die Risiken für die Menschheit unkalkulierbar. Wie die Wende zu einer klimaverträglichen Lebens- und Wirtschaftsweise rechtzeitig erreicht werden könnte, hat der Wissenschaftliche Beirat globale Umweltveränderungen der Bundesregierung (WBGU – der Autor ist eines der Mitglieder) 2011 in seinem Hauptgutachten „Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“ (WBGU 2011) zur Diskussion gestellt. Das weltweit wohl ambitionierteste Projekt einer solchen Transformation des Energiesystems stellt die international stark beachtete deutsche Energiewende dar, deren Erfolg oder Misserfolg für den globalen Klimaschutz eine erhebliche Signalwirkung haben wird.

Literatur

- ARCHER, D., and GANOPOLSKI, A.: A movable trigger: Fossil fuel CO₂ and the onset of the next glaciation. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 6, Q05003 (2005)
- ARRHENIUS, S.: On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 5, 237–276 (1896)
- BOLIN, B., and ERIKSSON, E.: Changes in the carbon dioxide content of the atmosphere and sea due to fossil fuel combustion. In: BOLIN, B. (Ed.): *The Atmosphere and the Sea in Motion: Scientific Contributions to the Rossby Memorial Volume*; pp. 130–142. Rockefeller Institute 1958
- Centre Nationale d'Etudes Spatiales: AVISO. Available online at: <http://www.aviso.oceanobs.com>
- CHURCH, J. A., and WHITE, N. J.: A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophys. Res. Lett.* 33, L01602 (2006)
- CHURCH, J. A., WHITE, N. J., KONIKOW, L. F., DOMINGUES, C. M., COGLEY, J. G., RIGNOT, E., GREGORY, J. M., VAN DEN BROEKE, M. R., MONAGHAN, A. J., and VELICOGNA, I.: Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophys. Res. Lett.* 38/11 (2011)
- COUMOU, D., and RAHMSTORF, S.: A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 2, 491–496 (2012)
- COUMOU, D., ROBINSON, A., and RAHMSTORF, S.: Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Clim. Change* 118/3–4, 771–782 (2013)
- FEULNER, G., and RAHMSTORF, S.: On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. *Geophys. Res. Lett.* 37, 5 (2010)

- FOSTER, G., and RAHMSTORF, S.: Global temperature evolution 1979–2010. *Environm. Res. Lett.* 6, 044022 (2011)
- FOURIER, J.-B. F.: Mémoire sur les Températures du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* 7, 569–604 (1827)
- HANSEN, J., NAZARENKO, L., RUEDY, R., SATO, M., WILLIS, J., DEL GENIO, A., KOCH, D., LACIS, A., LO, K., MENON, S., NOVAKOV, T., PERLWITZ, J., RUSSELL, G., SCHMIDT, G. A., and TAUSNEV, N.: Earth's energy imbalance: Confirmation and implications. *Science* 308, 1431–1435 (2005)
- HUMBOLDT, A. VON: Central-Asien. Untersuchungen über die Gebirgsketten und die vergleichende Klimatologie. Berlin: Klemann 1844
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Ed.): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press 2000
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Ed.): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge Univ. Press 2007
- KEMP, A., HORTON, B., DONNELLY, J., MANN, M. E., VERMEER, M., and RAHMSTORF, S.: Climate related sea-level variations over the past two millennia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 11017–11022 (2011)
- LÜTHI, D., LE FLOCH, M., BEREITER, B., BLUNIER, T., BARNOLA, J.-M., SIEGENTHALER, U., RAYNAUD, D., JOUZEL, J., FISCHER, H., KAWAMURA, K., and STOCKER, T. F.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature* 453, 379–382 (2008)
- MANN, M. E., ZHANG, Z. H., HUGHES, M. K., BRADLEY, R. S., MILLER, S. K., RUTHERFORD, S., and NI, F. B.: Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 13252–13257 (2008)
- MEINSHAUSEN, M., MEINSHAUSEN, N., HARE, W., RAPER, S. C. B., FRIELER, K., KNUTTI, R., FRAME, D. J., and ALLEN, M. R.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. *Nature* 458, 1158–1163 (2009)
- National Snow and Ice Data Center: Poles apart: A record-breaking summer and winter. Available online at: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2012/10/poles-apart-a-record-breaking-summer-and-winter/>
- ORR, J. C., FABRY, V. J., AUMONT, O., BOPP, L., DONEY, S. C., FEELY, R. A., GNANADESIKAN, A., GRUBER, N., ISHIDA, A., JOOS, F., KEY, R. M., LINDSAY, K., MAIER-REIMER, E., MATEAR, R., MONFRAY, P., MOUCHET, A., NAJAR, R. G., PLATTNER, G. K., RODGERS, K. B., SABINE, C. L., SARMIENTO, J. L., SCHLITZER, R., SLATER, R. D., TOTTERDELL, I. J., WEIRIG, M. F., YAMANAKA, Y., and YOOL A.: Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature* 437, 681–686 (2005)
- PARRIS, A., BROMIRSKI, P., BURKETT, V., CAYAN, D., CULVER, M., HALL, J., HORTON, R., KNUUTI, K., MOSS, R., OBEYSEKERA, J., SALLENGER, A., and WEISS, J.: Global Sea Level Rise Scenarios for the US National Climate Assessment. NOAA Tech Memo OAR CPO-1 (2012)
- PIERREHUMBERT, R. T.: Principles of Planetary Climate. Cambridge etc. Cambridge University Press 2011
- RAHMSTORF, S.: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368–370 (2007)
- RAHMSTORF, S.: Anthropogenic climate change: Revisiting the facts. In: ZEDILLO PONCE DE LEÓN, E. (Ed.): Global Warming: Looking Beyond Kyoto; pp. 34–53. Washington (DC): Brookings Institution Press 2008
- REVELLE, R., and SUESS, H. E.: Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO₂ during the past decades. *Tellus* 9, 18–27 (1957)
- ROBINE, J. M., CHEUNG, S. L. K., LE ROY, S., VAN OYEN, H., GRIFFITHS, C., MICHEL, J. P., and HERRMANN, F. R.: Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331, 171–175 (2008)
- ROHLING, E. J., and Coauthors (PALAEOSENS Project Members): Making sense of palaeoclimate sensitivity. *Nature* 491, 683–691 (2012)
- RUDDIMAN, W. F.: Earth's Climate: Past and Future. New York (NY, USA): Freeman 2000
- SCHAEFFER, M., HARE, W., RAHMSTORF, S., and VERMEER, M.: Long-term sea-level rise implied by 1.5 °C and 2 °C warming levels. *Nature Clim. Change* doi:10.1038/NCLIMATE1584 (2012)
- SCHNEIDER VON DEIMLING, T., HELD, H., GANOPOLSKI, A., and RAHMSTORF, S.: Climate sensitivity estimated from ensemble simulations of glacial climate. *Clim. Dyn.*, 27, 149–163 (2006a)
- SCHNEIDER VON DEIMLING, T., GANOPOLSKI, A., HELD, H., and RAHMSTORF, S.: How cold was the Last Glacial Maximum? *Geophys. Res. Lett.* 33 (2006b)
- SIEGENTHALER, U., STOCKER, T. F., MONNIN, E., LÜTHI, D., SCHWANDER, J., STAUFFER, B., RAYNAUD, D., BARNOLA, J.-M., FISCHER, H., MASSON-DELMOTTE, V., and JOUZE, J.: Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science* 310, 1313–1317 (2005)
- TYNDALL, J.: Note on the transmission of radiant heat through gaseous bodies. *Proc. Royal Soc. London* 10, 37–39 (1859)
- VERMEER, M., and RAHMSTORF, S.: Global sea level linked to global temperature. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106, 21527–21532 (2009)

- WAHL, T., JENSEN, J., FRANK, T., and HAIGH, I.: Improved estimates of mean sea level changes in the German Bight over the last 166 years. *Ocean Dyn.* *61*, 701–715 (2011)
- WBGU (German Advisory Council on Global Change): *The Future Oceans – Warming Up, Rising High, Turning Sour*. WBGU 2006
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz*. WBGU 2009
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. WBGU 2011

Prof. Dr. Stefan RAHMSTORF
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PO Box 60 12 03
14412 Potsdam
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 331 288 26 88
Fax: +49 331 288 26 20
E-Mail: stefan.rahmstorf@pik-potsdam.de

Herausforderungen des Globalen Wandels

Die Kommunikation von Risiken in einer Welt im globalen Wandel

Ralph HERTWIG ML (Berlin)

Mit 8 Abbildungen



Zusammenfassung

Wie kommuniziert man transparent die Risiken der modernen Welt? Gute Risikokommunikation ist kein Buch mit sieben Siegeln mehr. Die psychologische Grundlagenforschung konnte in den letzten ein bis zwei Jahrzehnten überzeugende Antworten liefern, wie objektive Risiken verständlich dargeboten werden können. Im Kontext medizinischer Entscheidungen können zum Beispiel relative Risikoangaben verwirren, wohingegen absolute Risikoangaben Einsicht schaffen. Was Menschen Angst macht oder was sie in Ruhe wiegt, hängt aber bei Weitem nicht nur von dem objektiven Risiko eines Ereignisses ab. Wie risikoreich ein Ereignis subjektiv wahrgenommen und eingeschätzt wird, hängt auch davon ab, ob das Risiko schon bekannt ist oder ob es ein neuartiges Phänomen darstellt und ob die zu erwartenden Konsequenzen chronischer oder katastrophaler Art sind. Diese beiden Dimensionen führen dazu, dass wir neue Phänomene, deren Eintreten sehr unwahrscheinlich und selten ist, die aber, sofern sie eintreten, verheerende Schäden für viele Menschen verursachen (z. B. terroristische Anschläge wie der des 11. Septembers 2001), als risikoreicher einschätzen als Risiken, die alt und vertraut sind und über die Zeit verteilt viele Menschen umbringen (z. B. hoher Blutzuckerspiegel). Die subjektiven Dimensionen der Risikowahrnehmung bedeuten eine große Herausforderung für die Risikokommunikation, auch und gerade bezüglich der Kommunikation schwerwiegender Folgen der globalen Erwärmung. Eine zweite Herausforderung hängt damit zusammen, wie Menschen Kenntnis über ein Risiko erlangen. Ein Mensch, der über persönliche Erfahrung mit einem bestimmten Ereignis verfügt, schätzt dessen Gefahren in der Regel systematisch anders ein als eine Person, die lediglich über deskriptive Information zu dem entsprechenden Risiko verfügt. Deskriptive Risikowarnungen verlieren an Überzeugungskraft, wenn sie in Widerspruch mit dem stehen, was jemand jeden Tag direkt und persönlich erfährt. Je mehr wir über diese und andere psychologische Hintergründe unserer Risikowahrnehmung erfahren, desto besser können wir Menschen helfen, kompetent mit Risiken und Ängsten umzugehen.

Abstract

How can the risks of the modern world be communicated transparently? Effective risk communication is no longer a closed book. In the last decade or two, basic research in psychology has been able to provide important insights into how objective risks can best be presented in comprehensible form. In the context of medical decisions, for example, it is now known that presenting risks in relative terms can be confusing, whereas stating risks in absolute terms clarifies the situation. However, what worries people or sets their mind at rest is not dependent solely on the objective risk of an outcome. In fact, how risky an outcome is subjectively perceived to be also depends on whether the risk is known or new, and on whether its expected consequences are chronic or catastrophic. These two dimensions lead to people estimating new phenomena, the occurrence of which is highly unlikely, but which have devastating effects on countless people if they do occur (e. g., terrorist attacks, such as those of September 11, 2001), as being of higher risk than phenomena that are old, known, and kill high numbers of people over time (e. g., high blood sugar levels). These subjective dimensions of risk perception present a considerable challenge for the communication of risks in general and of the dire consequences of global warming in particular. A second challenge relates to how people become aware of a risk. Somebody who has had personal experience of a certain outcome tends to gauge its dangers from a systematically different perspective than someone who has merely had access to descriptive information on the risk at hand. Descriptive risk warnings lose the power to convince when they are at odds with people's everyday experiences. The more we learn about these and other psychological factors impacting people's perception of risk, the better we can help people to deal competently with risks and their worries.

1. Einführung in die psychologische Risikoforschung: Zwei „Geschichten“

Die Welt im 21. Jahrhundert sieht sich mit einer Reihe von neuen Herausforderungen und Gefahren potenziell katastrophalen Ausmaßes konfrontiert. Beispiele für derartige Risiken sind die Zunahme extremer Wetterschwankungen, die Gefahr von Epidemien infolge der globalen Erwärmung, das Restrisiko von diversen Großtechnologien (z. B. Atomkraftwerken) oder völlig neuartige Manifestationen des internationalen Terrorismus. Wie Staatsbürger, Entscheidungsträger und Institutionen auf diese und ähnliche Bedrohungen reagieren, hängt zum einen von psychologischen Faktoren ab, die unserer Risikowahrnehmung zugrunde liegen, und zum anderen auch davon, ob Risiken und deren Implikationen transparent und verständlich kommuniziert werden. In dem vorliegenden Beitrag werde ich Sie in die Forschung zur Psychologie der Risikowahrnehmung und Risikokommunikation einführen. Allerdings stellt mich dieses Vorhaben vor ein Dilemma – das Dilemma, mich zwischen zwei möglichen Geschichten entscheiden zu müssen, die ich Ihnen im Detail erzählen könnte. Um welche beiden Geschichten handelt es sich?

Die erste Geschichte ist die Geschichte eines Erfolges. Auf der Grundlage vielfältig replizierter Forschungsergebnisse zur Psychologie der Risikowahrnehmung und Risikokommunikation können wir heute eindeutige Empfehlungen aussprechen, wie Statistiken zu den Risiken des Alltagslebens auf eine transparente und verständliche Art und Weise präsentiert werden können. Das Ziel dieser Kommunikationen ist es, dem Rezipienten – also beispielsweise der Patientin, dem Arzt, dem Wähler, der Politikerin oder ganz allgemein der Staatsbürgerin – diese Risiken so zu vermitteln, dass er oder sie mehr Einsicht in diese Risiken gewinnen kann.¹ So wissen wir heute unter anderem, dass einem Patienten der effektive Nutzen einer medizinischen Behandlung eher durch die Angabe von *absoluten Risiken* anstelle einer Erläuterung der *relativen Risikoreduktion* verständlich gemacht werden kann. Was versteckt sich hinter diesen Begriffen? Lassen Sie mich Ihnen diese am Beispiel des Nutzens der Mammographie erläutern.

Ein Arzt kann eine Frau darüber informieren, dass die regelmäßige Teilnahme an der Mammographie über zehn Jahre das Risiko, an Brustkrebs zu sterben, um 25 % reduziert. Diese Größenordnung klingt beeindruckend. Allerdings enthält diese Zahl keinerlei Informationen zur Basisrate des Ereignisses. Das ist verwirrend, und die wahre Größenordnung des potenziellen Nutzens kann man so kaum verstehen. Um die Fehleinschätzung des Nutzens – hier vermutlich seine (nicht unbeabsichtigte) Überschätzung – zu vermeiden, kann man diesen alternativ in Gestalt absoluter Häufigkeiten kommunizieren. Eine regelmäßige Teilnahme an der Mammographie über einen Zeitraum von zehn Jahren reduziert das Risiko, an Brustkrebs zu sterben, von etwa 4 auf 3 pro 1000 Frauen, also um 0,1 % (oder eine von 1000 Frauen).

Die *absolute Risikoreduktion* ist die Anzahl der Frauen, die ohne Mammographie-Screening starben, abzüglich der Anzahl der Frauen, die mit Screening starben. In absoluten Häufigkeiten beträgt die Reduktion des Risikos, an Brustkrebs zu sterben, 4 minus 3; also eine von 1000 Frauen wird durch die regelmäßige Teilnahme am Mammographie-Screening gerettet. Die *relative Risikoreduktion* beinhaltet die absolute Risikoreduktion

¹ Siehe z. B. GIGERENZER et al. 2007, WEGWARTH und GIGERENZER 2011a, b.

geteilt durch die Anzahl der Frauen, die ohne Screening starben. Sie beträgt in unserem Beispiel ein Viertel, also 25%.²

Man sieht jetzt deutlich den Unterschied zwischen diesen beiden Arten, den Nutzen einer Behandlung zu kommunizieren. Um Missverständnisse zu vermeiden, lassen Sie uns klarstellen, dass natürlich beide Darstellungen mathematisch korrekt sind. Sie suggerieren aber jeweils einen unterschiedlich hohen Nutzen und können daher auch eine höhere oder niedrigere Bereitschaft zur Teilnahme auslösen. Eine 25%ige Risikominderung legt nahe, dass viele Menschenleben gerettet werden, unabhängig davon, wie häufig oder wie selten die Krankheit ist. Im Gegensatz dazu erlaubt die Angabe der absoluten Risikoreduktion von 0,1% (1 von 1000 Frauen) einen direkten und transparenten Einblick in die wahre Größenordnung der Risikoreduktion.

Der Unterschied zwischen relativen und absoluten Risikoangaben und ihren interpretativen Konsequenzen ist nur eine von vielen bedeutsamen Einsichten, die die psychologische Forschung zur Risikokommunikation in den letzten Jahren gewonnen hat (GIGERENZER 2002). Eine weitere wichtige Unterscheidung ist die zwischen *natürlichen Häufigkeiten* und *bedingten Wahrscheinlichkeiten* (HOFFRAGE et al. 2000). Die Forschung zum statistischen Denken hat wiederholt gezeigt, dass viele Laien und auch manche Experten aus bedingten Wahrscheinlichkeiten – wie etwa der Sensitivität oder der Falsch-Positiv-Rate eines medizinischen Tests (z. B. HIV-Test) – die falschen Schlüsse ziehen (GIGERENZER und HOFFRAGE 1995).

Kehren wir noch einmal zum Thema Brustkrebs-Screening durch Mammographie zurück. Nach einschlägigen Untersuchungen (KERLIKOWSKA et al. 1996) beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass eine 50-jährige Frau Brustkrebs hat, etwa 0,8%. Hat eine Frau Brustkrebs, beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass das Mammogramm positiv ist, etwa 90%. Dieser Wert beschreibt die Sensitivität des Screening-Verfahrens. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Mammogramm positiv ausfällt, obgleich sie keinen Brustkrebs hat, liegt bei etwa 7%. Dieser Wert beschreibt die Falsch-Positiv-Rate des Verfahrens. Welche Wahrscheinlichkeit folgt aus diesen Werten? Das heißt, wie wahrscheinlich ist es, dass eine Frau mit einem positiven Mammogramm tatsächlich Brustkrebs hat? Wenn es Ihnen so geht wie den meisten Laien und medizinischen Experten in vielen Untersuchungen, dann werden Sie angesichts der bedingten Wahrscheinlichkeiten verwirrt sein. Ihnen wird es schwerfallen, überhaupt eine Antwort zu generieren, und die Antwort, die Sie schlussendlich finden, wird mit großer Wahrscheinlichkeit falsch sein.

Die richtige Antwort kann man jedoch relativ leicht sehen, wenn man eine andere Form der Kommunikation wählt – eine Form, an die sich das menschliche Gehirn im Laufe der Evolution möglicherweise angepasst hat: *natürliche Häufigkeiten* (GIGERENZER und HOFFRAGE 1995). Von jeweils 1000 Frauen leiden 8 an Brustkrebs. Von diesen werden wiederum 7 ein positives Mammogramm haben (Sensitivität). Von den verbleibenden 992 Frauen, die keinen Brustkrebs haben, werden trotzdem etwa 70 ein positives Mammogramm erhalten (Falsch-Positiv-Rate). Fokussieren wir jetzt nur auf jene 77 Frauen, deren Mammogramm beim Screening positiv ausfiel. Wie viele von ihnen haben tatsächlich Brustkrebs? Die Häufigkeiten, die ich Ihnen mitgeteilt habe, sind die gleichen wie oben (abgesehen vom Ab- und Aufrunden), nur war oben von bedingten Wahrscheinlichkeiten die Rede. Die richtige Ant-

2 Die hier verwendeten Zahlen beruhen auf den Zwischenergebnissen mehrerer randomisierter kontrollierter Studien; siehe WEGWARTH und GIGERENZER 2011a.

wort ist jetzt aber viel leichter zu erkennen. Nur 7 von den insgesamt 77 Frauen mit positivem Mammogramm haben Brustkrebs. Das entspricht 1 von 11 oder 9%.

Die Erkenntnisse, dass absolute Risiken transparenter sind als relative oder dass sowohl Patienten wie auch Ärzte natürliche Häufigkeiten besser verstehen als bedingte Wahrscheinlichkeiten, sind bedeutende Errungenschaften, auf deren Grundlage eine effiziente Risikokommunikation wichtiger Risiken erst möglich geworden ist. Und diese beiden Resultate sind nur zwei von vielen Beispielen, die die Erfolgsgeschichte der psychologischen Grundlagenforschung zur Risikokommunikation ausmachen. Ich könnte Ihnen diese Erfolgsgeschichte in aller Ausführlichkeit erzählen. Aber es gibt da noch eine andere Geschichte. Eine Geschichte, die von unbeantworteten Fragen handelt. Ich möchte Ihnen diese andere Geschichte in Anbetracht einer Welt, die effiziente Risikokommunikation und die Fähigkeit, kompetent mit Risiken umzugehen, mehr denn je braucht, nicht verschweigen.

Die andere Geschichte, um die es im Folgenden gehen wird, handelt von unserer subjektiven Risikoeinschätzung und den daraus resultierenden Schwierigkeiten einer guten Risikokommunikation. Wie wir gleich sehen werden, ist die Frage, wie unsere subjektive Risikoeinschätzung funktioniert, äußerst relevant im Hinblick auf das Thema dieser Jahresversammlung: globaler Wandel.

2. Ist die Welt im globalen Wandel unsicherer geworden?

Beginnen wir mit einem Phänomen, das Sie vermutlich zunächst erstaunlich finden werden, insbesondere in Anbetracht der großen Fortschritte in der verständlichen Kommunikation objektiver Risiken: Die Öffentlichkeit, zumindest die US-amerikanische, empfindet sich heute als verletzlicher gegenüber Risiken der modernen Welt als in der Vergangenheit – und dies ungeachtet des kontinuierlichen technologischen und medizinischen Fortschritts. Dafür gibt es eine Reihe möglicher Erklärungen, von denen ich im Folgenden zwei diskutieren möchte. Einerseits ist es ja durchaus denkbar, dass die Öffentlichkeit mit ihrer Einschätzung richtig liegt und die Welt im globalen Wandel im Vergleich zur jüngeren Historie tatsächlich gefährlicher geworden ist. Andererseits – und mit dieser Möglichkeit werde ich mich näher befassen – könnte es der Fall sein, dass sich die Dinge, die uns ängstigen, nicht einfach nur auf ihr objektives Risiko, beispielsweise die statistisch errechnete Wahrscheinlichkeit widriger Konsequenzen wie Tod, Verletzungen oder Invalidität, reduzieren lassen. Das bedeutet, dass wir die Risikowahrnehmung und Risikoeinschätzung der Öffentlichkeit nicht richtig verstehen können, solange wir uns nur auf die statistischen Wahrscheinlichkeiten negativer Konsequenzen konzentrieren und diese kommunizieren.

Könnte es sein, dass die Welt im Laufe der letzten Jahrzehnte tatsächlich gefährlicher geworden ist? Es ist leicht, Ihnen Fakten zu präsentieren, die dafür sprächen, dass die Welt im globalen Wandel in der Tat gefährlicher oder zumindest volatiler geworden ist. Nehmen wir zum Beispiel die Häufigkeit extremer Wetterereignisse als Folge der globalen Erwärmung. Die USA war in jüngster Vergangenheit von diesen Ereignissen besonders betroffen. Das Jahr 2012 war das im Schnitt wärmste Jahr seit Beginn systematischer Temperaturmessungen (im Jahre 1895).³ Nahezu zwei Drittel der US-amerikanischen Landfläche waren im

³ <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/2012/13>.

September 2012 von einer extremen Dürre betroffen, ein weiteres Rekordwetterereignis. Der Wirbelsturm Sandy hat an der Nordostküste der USA Schäden in Höhe von geschätzten 80 Milliarden Dollar verursacht (u. a. wurden Schätzungen zufolge 305 000 Wohnungen beschädigt; DECONCINI and TOMPKINS 2013). Aber natürlich ist nicht nur die USA von diesen extremen Wetterereignissen betroffen. Abbildung 1 zeigt eine Weltkarte mit Rekordwetterereignissen in der Dekade 2000 bis 2011 (COUMOU und RAHMSTORF 2012). In diesem Zeitraum gab es eine erstaunliche Häufung von Wetterrekorden: Rekordhitzewellen, Rekorddürren, Rekordniederschläge, Rekordhurrikane usw. Man könnte also angesichts dieser Häufung extremer Wetterereignisse in der Tat zu dem Schluss kommen: Ja, die Welt ist risikoreicher geworden.

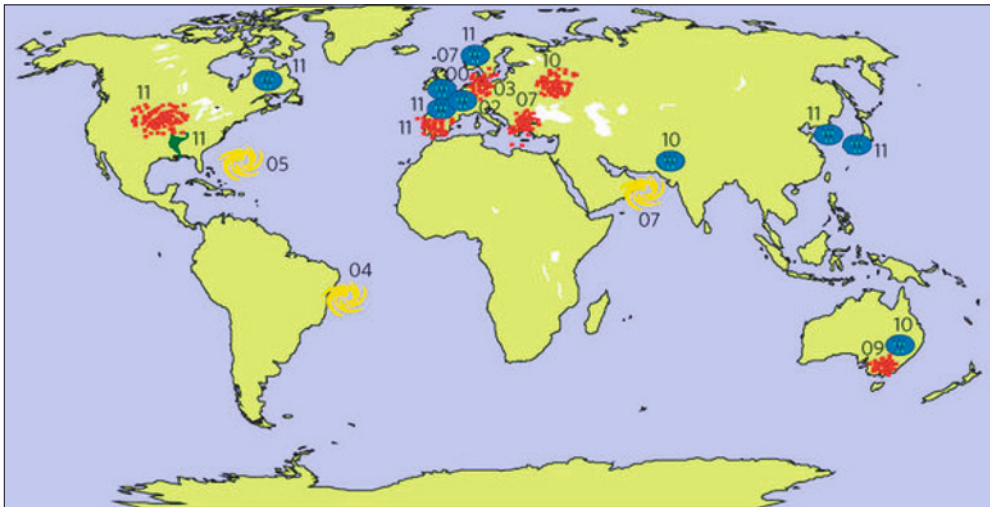


Abb. 1 Rekordbrechende, extreme Wetterereignisse weltweit von 2000 bis 2011. Die zweistelligen Ziffern geben das jeweilige Jahr an. Die blauen Symbole stehen für Niederschlag; die roten für Hitzewellen/Dürren; die gelben für Hurrikane und die grünen für Wirbelstürme. Quelle: COUMOU und RAHMSTORF 2012.

Genau diesen Schluss könnte man auch ziehen, wenn man sich Abbildung 2 anschaut. Seit Jahren erleben wir eine Welt, die mit den katastrophalen Konsequenzen einer globalen Wirtschaftskrise zu kämpfen hat. Der Ausgangspunkt dieser Weltwirtschaftskrise war das Platzen der Immobilienblase auf dem US-amerikanischen Wohnungsmarkt. Abbildung 2 zeigt die inflationsbereinigte Entwicklung der Immobilienpreise in den USA von 1890 bis in die Gegenwart. Es gab während des 20. Jahrhunderts immer wieder Preisschwankungen, insbesondere im Zuge der Weltwirtschaftskrise in den 1920er und 1930er Jahren sowie während des Ersten und Zweiten Weltkrieges. Wenn man sich das Auf und Ab der Preise jedoch genauer anschaut, stellt man fest, dass die mit Abstand größten Schwankungen, die es bislang gab, ab Ende der 1990er Jahre bis in die jüngste Vergangenheit beobachtbar waren. Also nicht etwa in einem Zeitraum, in dem die Welt mit einem katastrophalen politischen Ereignis, wie zum Beispiel einer globalen Katastrophe in Gestalt eines Weltkriegs, zu kämpfen gehabt hätte. In diesem Zeitfenster unserer jüngsten Vergangenheit hat sich der durchschnittliche Immobilienpreis innerhalb weniger Jahre mehr als ver-

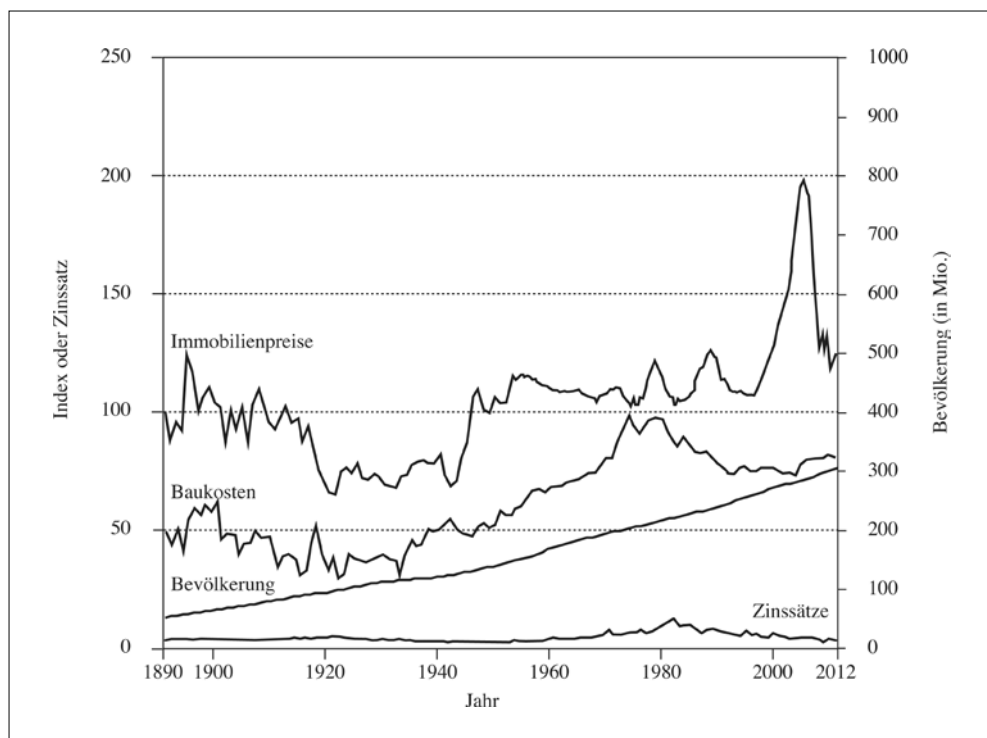


Abb. 2 Entwicklung des inflationsbereinigten Immobilienpreises in den USA von 1890 bis 2012. Der Richtwert (Index) in der Grafik ist 100. Wenn also 1890 ein Haus – inflationsbereinigt – durchschnittlich für 100 000 US-Dollar verkauft wurde, hätte man für ein gleichwertiges Objekt 1920 66 000 (Wert 66 auf der Skala) und 2006 199 000 US-Dollar (Wert 99 auf der Skala, 99% höher als 1890) bezahlt (Rohdaten wurden von Robert SHILLERS webpage <http://www.irrationalexuberance.com> heruntergeladen).

doppelt, um dann in den Folgejahren drastisch zurückzufallen auf ein Niveau, das – inflationsbereinigt – fast dem des ausgehenden 19. Jahrhunderts entspricht.

Die genannten Beispiele lassen sich als Indizien dafür interpretieren, dass die Welt in der Tat risikoreicher, volatiler geworden ist. Einen abschließenden Beweis für diese These liefern sie allerdings kaum. Denn wie Sie sicher bereits vermuten, lassen sich ebenso Beispiele für die gegenteilige These – die Welt ist sicherer geworden – finden. Evidenz für diese These findet man im Kontext infektiöser Krankheiten wie zum Beispiel der HIV-Erkrankung.⁴ Abbildung 3 zeigt die Prävalenzrate von HIV-Erkrankungen in der Bundesrepublik Deutschland von 1978 bis 2010 (hellgraue Fläche). Die Zahl der registrierten HIV-Fälle hat also über die Jahre hinweg enorm zugenommen. Die dünne schwarze Linie zeigt allerdings, dass gleichzeitig die Todesfälle infolge einer HIV-Infizierung erheblich zurückgegangen sind. Seit Mitte der 1990er Jahre halten sich die HIV-Todesfälle auf einem konstant niedrigen Niveau, und die Tendenz ist weiterhin leicht abnehmend. Mit Hilfe dieser Statistik ließe sich argumentieren, dass die Welt sicherer geworden ist.

4 HIV – Humanes Immundefizienz-Virus.

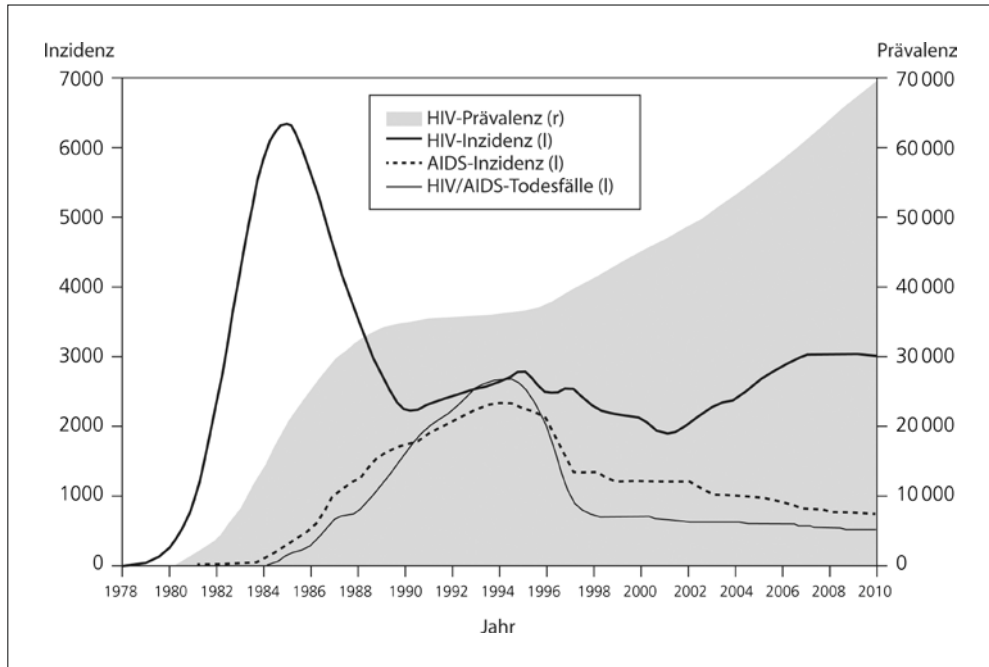


Abb. 3 Geschätzte HIV/AIDS-Inzidenz, -Prävalenz und -Todesfälle in Deutschland, Stand: Ende 2010. Quelle: Robert-Koch-Institut 2010.

Sicherer ist die Welt auch in anderen Bereichen geworden, beispielsweise im Straßenverkehr. Seit 1906 wird in Deutschland eine Unfallstatistik des Straßenverkehrs geführt. Im ersten Berichtsjahr 1906/07 wurden auf insgesamt 27 026 zugelassene Kraftfahrzeuge 145 tödliche Verkehrsunfälle gezählt. Die Höchstzahl an Unfallopfern wurde 1970 mit 21 332 Verkehrstoten registriert. Der Bestand an Kraftfahrzeugen hatte sich auf 20,8 Millionen erhöht. Seitdem hat sich aber die Opferzahl kontinuierlich verringert. Im Jahre 2011 betrug sie 4009, obschon die Zahl der motorisierten Fahrzeuge auf 52,9 Millionen angestiegen war. Das auf den jeweiligen Kraftfahrzeugbestand bezogene Risiko, bei Unfällen im Straßenverkehr zu sterben, war damit 1906/07 fast 70-mal höher als 2011 (*Statistisches Bundesamt* 2012).

Was wir aus diesen Statistiken mitnehmen können, ist Folgendes: Die Frage, ob die Welt sicherer oder unsicherer geworden ist, kann letztendlich nicht beantwortet werden; sie zu stellen, ist müßig. Wir verfügen über keine gemeinsame Metrik, auf der wir die ganzen bekannten, geschweige denn die unbekanntes Risiken dieser Welt abbilden und so bemessen könnten, ob das gegenwärtige Gefahrenpotenzial im Vergleich zur Vergangenheit zugenommen hat, stagniert oder rückläufig ist. Was wir aber – wie zu Beginn erwähnt – wissen, ist, dass die Welt *subjektiv*, also in der Wahrnehmung der Staatsbürger in den USA, unsicherer geworden ist. Woran könnte das liegen? Mit welchen, möglicherweise psychologischen Faktoren könnte dies zusammenhängen?

3. Die subjektive Risikowahrnehmung

Ein relativ stabiler Befund aus der Risikoforschung ist der, dass sich die subjektive Risikowahrnehmung der Staatsbürger nicht einfach auf ein wie auch immer definiertes objektives Risiko zurückführen bzw. reduzieren lässt. Wie hoch ein Risiko dem persönlichen Empfinden nach eingeschätzt wird, ergibt sich nicht ausschließlich aus dem tatsächlich bestehenden Gefahrenpotenzial, sondern wird von mehreren anderen psychologischen Faktoren beeinflusst. Ich werde nicht im Detail erläutern, wie die psychologische Risikoforschung zu dieser Schlussfolgerung gelangt ist, sondern ich möchte Ihnen in groben Zügen erklären, was wir über die psychologischen Hintergründe der subjektiven Risikowahrnehmung heute wissen.

3.1 Zwei zentrale psychologische Risikodimensionen

Die vorherrschende Ansicht in der psychologischen Grundlagenforschung ist, dass die subjektive Risikowahrnehmung im Wesentlichen durch zwei elementare psychologische Risikodimensionen bestimmt wird (SLOVIC 2000). In Abbildung 4 sind die entgegengesetzten Pole beider Risikodimensionen illustriert. Die erste Dimension umfasst den Bekanntheitsgrad eines Risikos aus der Perspektive des Betroffenen. Beispielsweise werden Ereignisse, Aktivitäten und Technologien, die bekannt und beobachtbar sind, bei denen der Betroffene um seine Gefährdung weiß und deren Auswirkungen unmittelbar eintreten, generell für weniger risikoreich befunden als neuartige Phänomene, die nicht beobachtbar sind, deren Bedrohlichkeit für den Betroffenen nicht ersichtlich ist und deren Konsequenzen verzögert in Erscheinung treten. Die erste Risikodimension lässt sich, sehr vereinfacht, auf die Gegenpole **bekannt versus unbekannt** reduzieren.

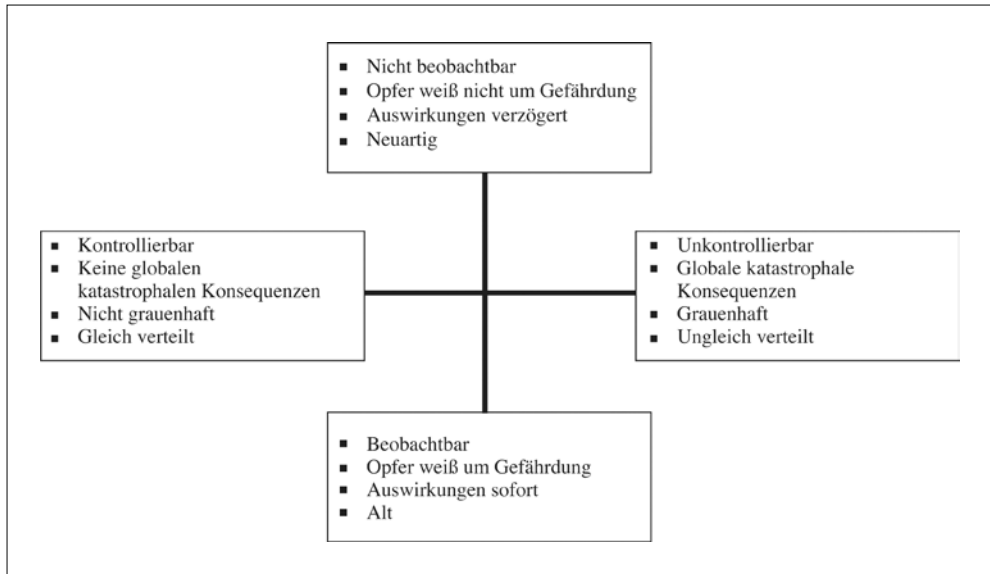


Abb. 4 Darstellung und Beschreibung der zwei psychologischen Dimensionen, die der subjektiven Risikowahrnehmung zugrunde liegen. Quelle: SLOVIC 2000.

Die zweite Dimension hängt mit der Art und dem Ausmaß einer Gefahr zusammen. Je mehr ein Ereignis, eine Aktivität oder eine Technologie als etwas wahrgenommen wird, das unkontrollierbar ist, desto höher wird das Risiko eingeschätzt. Je mehr das Ereignis verheerende Konsequenzen nach sich ziehen könnte, die als grauenhaft und ungleich verteilt wahrgenommen werden und nicht den Einzelnen treffen, sondern potenziell eine größere Anzahl von Menschen, desto mehr Angst erweckt es. Die Ereignisse, die diese Eigenschaften in hohem Maße haben, bezeichnet man als „dread risks“ (SLOVIC 1987). Im Vergleich zu diesen haben wir weniger Angst vor Risiken, bei denen viele Menschen, verteilt über einen längeren Zeitraum, auf unspektakuläre Weise zu Tode kommen. Jedes Jahr sterben zum Beispiel Tausende Menschen an Infektionen, die sie sich in deutschen Krankenhäusern zugezogen haben. Dennoch haben wir weniger Angst vor resistenten Krankenhauskeimen als vor dem globalen Terrorismus, einem paradigmatischen *Dread-Risiko*.

Abbildung 5 illustriert, welche Risiken in die vier Quadranten fallen, die durch diese beiden Dimensionen gebildet werden. Risiken, die zugleich als relativ unbekannt (neu) und potenziell katastrophal wahrgenommen werden, schreibt unsere subjektive Risikowahrnehmung ein großes Gefahrenpotenzial zu – beispielsweise DNA-Technologie, elektrische Felder oder Unfälle in Atomkraftwerken (oberer rechter Quadrant). Hingegen werden bekannte und chronische Bedrohungen und solche, die den Einzelnen umbringen (also kein kollektives Katastrophenpotenzial haben), als deutlich weniger risikoreich empfunden – beispielsweise Rauchen, Fahrrad- oder Motorradfahren (unterer linker Quadrant).

Bemerkenswert und zugleich problematisch ist dabei die Tatsache, dass Menschen häufig gerade die Dinge als weniger risikoreich wahrnehmen, bei denen die Wahrscheinlichkeit, an ihnen zu sterben, relativ gesehen höher ist. Die subjektive Risikowahrnehmung verhält sich also gelegentlich diametral zur Höhe des objektiven Risikos, definiert auf der Grundlage des Urteils von Experten (SLOVIC 2000). Problematisch ist dieser Sachverhalt insofern, als die subjektive Risikowahrnehmung einen unmittelbaren Einfluss auf das Bedürfnis nach regulativen Maßnahmen hat (SLOVIC 1987). Dies veranschaulicht Abbildung 6. Die Punktgröße steht repräsentativ für das Ausmaß, in dem Menschen wünschen, dass der Gesetzgeber oder die Gesellschaft strikte Maßnahmen ergreift, um das korrespondierende Risiko zu reduzieren. Das heißt also, das Bedürfnis danach, die im rechten oberen Quadranten abgebildeten Risiken – die uns jedoch weniger wahrscheinlich umbringen werden als z. B. Alkohol, Motorradunfälle oder die Folgen von Adipositas – zu regulieren und zu diesem Zweck kollektive Ressourcen zu mobilisieren, ist relativ stark ausgeprägt. Bei den alltäglichen Risiken (unterer linker Quadrant), von denen wir eher betroffen sein werden, ist das Bedürfnis nach Regulierung hingegen schwächer. Daraus ergibt sich das Dilemma, dass ein Teil der verfügbaren kollektiven Ressourcen vermutlich falsch eingesetzt wird. Diese Ressourcen werden für Dinge verwendet, die zwar subjektiv gefährlich erscheinen, uns aber objektiv weniger wahrscheinlich umbringen werden als andere Dinge, denen wir weniger Beachtung schenken.

3.2 *Wie Medien und wir selbst unser Risikoverhalten beeinflussen*

Der Einfluss der beiden psychologischen Risikodimensionen auf unsere Wahrnehmung wird dadurch verstärkt, dass wir in einer medialen Welt leben, die dazu neigt, ein „Vergrößerungsglas“ auf katastrophale und relativ unbekannte Risiken zu richten (SLOVIC 2000).

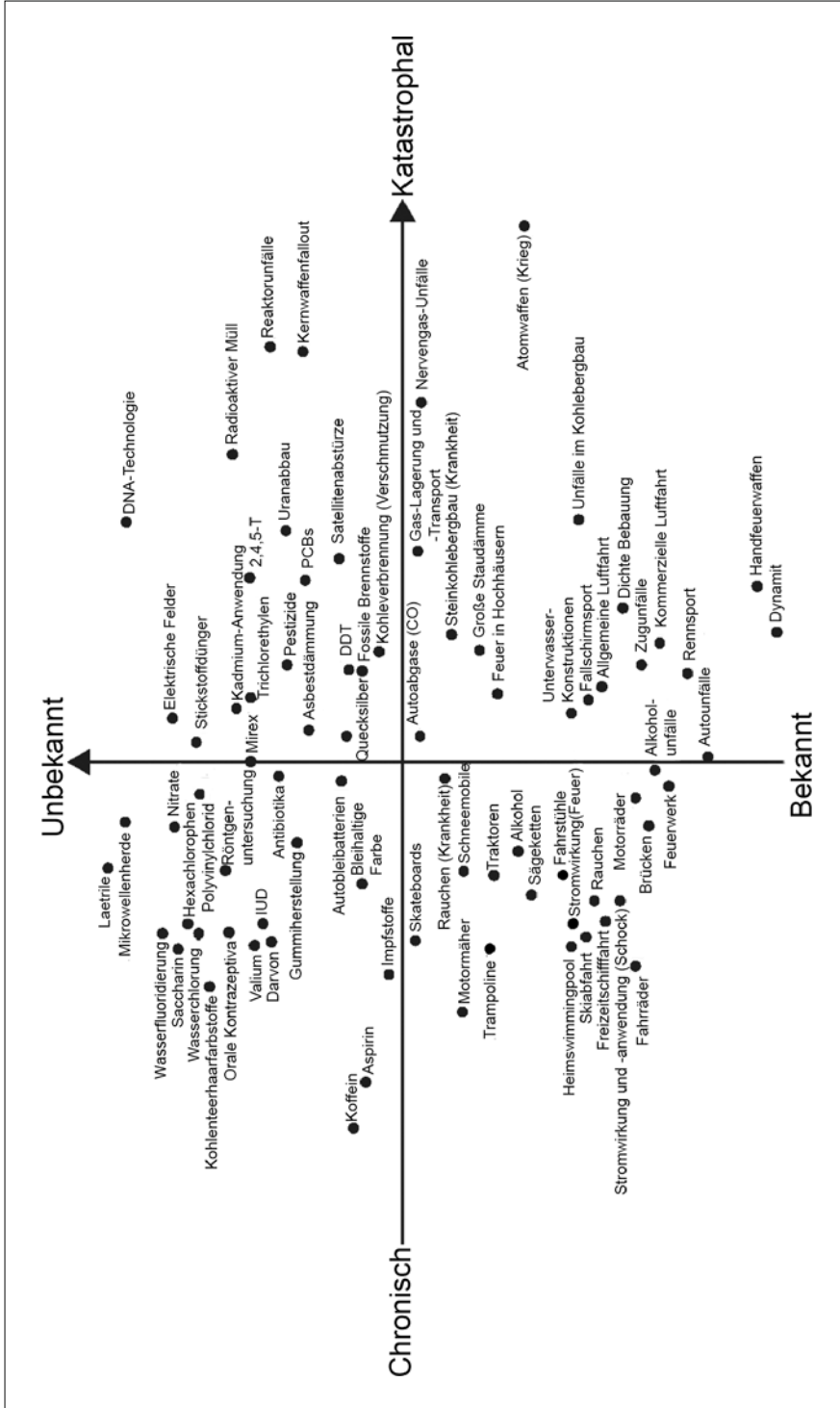


Abb. 5 Verortung von 78 Risiken auf den psychologischen Dimensionen der subjektiven Risikowahrnehmung (modifiziert nach SLOVIC 1987). IUD – Intrauterinpressare (ugs.: Spirale; ein Medizinprodukt zur Empfängnisverhütung), PCBs – Polychlorierte Biphenyle, DDT – Dichlordiphenyltrichlorethan (ein Insektizid), 2,4,5-T – 2,4,5-Trichlorphenoxyessigsäure (ein Herbizid).

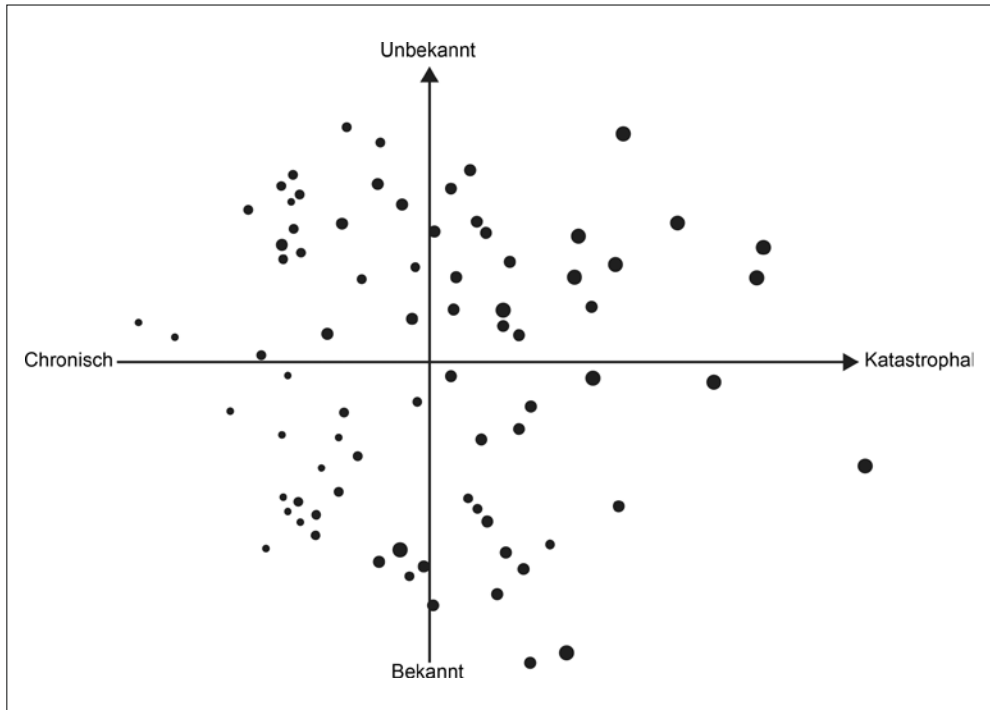


Abb. 6 Einstellungen gegenüber risikoregulierenden Maßnahmen. Je größer der Punkt, desto stärker das Regulierungsbedürfnis mit dem Ziel einer Reduktion des entsprechenden Risikos (modifiziert von SLOVIC 1987).

Wir erinnern uns alle an die für kurze Zeit allgegenwärtige Berichterstattung zum sogenannten Rinderwahnsinn (BSE),⁵ zu einer möglichen SARS-Pandemie,⁶ zum Atomreaktorunfall in Fukushima, zum Tsunami in Asien, an dessen Folgen 2004 über 200 000 Menschen zu Tode kamen, und zu den Anschlägen des 11. Septembers und deren Folgen. Natürlich gibt es auch das Pendant dazu. Die mediale Berichterstattung „verkleinert“ bestimmte Risiken, indem sie relativ selten über jene Gefahren redet, die uns mit einer nicht trivialen Wahrscheinlichkeit gesundheitlich schaden und schlussendlich sogar umbringen können, beispielsweise die Folgen von übermäßigem Alkoholgenuß, sexuell übertragenen Krankheiten oder die drastischen Konsequenzen von Adipositas (Fettleibigkeit).

Nun möchte ich aber keiner billigen Medienschele das Wort reden. Denn zum einen könnte man argumentieren, dass die Medienberichterstattung im Wesentlichen auf die Bedürfnisse der Rezipienten reagiert. Sie spiegelt, so eine Sichtweise, lediglich *unsere* subjektive Risikowahrnehmung wider, die besonders die neuen und potenziell katastrophalen Gefahren in den Blickwinkel nimmt. Zum anderen muss man fairerweise einräumen, dass wir alle durch unser Nutzer- und Konsumentenverhalten aktiv Anteil nehmen an der sozialen Vergrößerung oder Verkleinerung bestimmter Risiken.

5 BSE – Bovine spongiforme Enzephalopathie.

6 SARS – Severe Acute Respiratory Syndrome (schweres akutes Atemnotsyndrom).

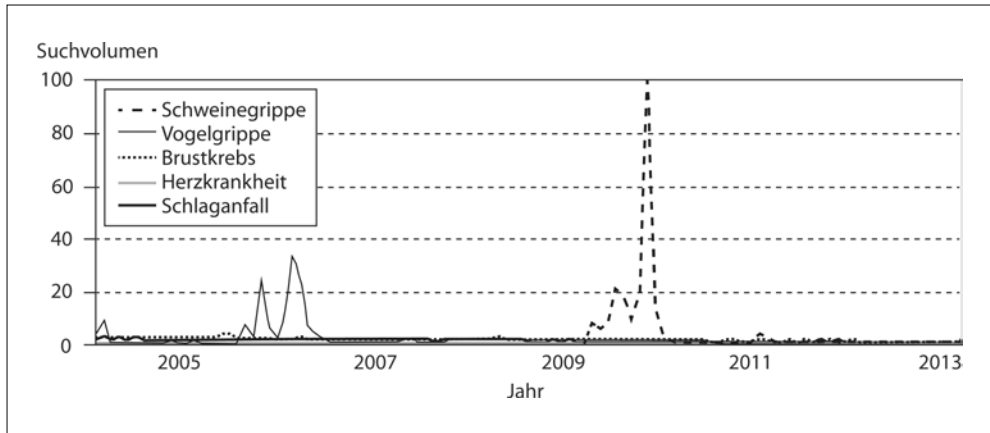


Abb. 7 Google-Trend-Analyse für fünf Suchbegriffe (Schweinegrippe, Vogelgrippe, Brustkrebs, Herzkrankheit, Schlaganfall) im Zeitraum 2004 bis März 2013. Abgetragen ist das Suchvolumen für diese Begriffe, normiert am Suchvolumen mit dem höchsten Umfang (Schweinegrippe = 100).

Dazu gibt Abbildung 7 ein konkretes Beispiel. Sie zeigt die Häufigkeit von Google-Abfragen im Zeitraum von 2004 bis März 2013, bei denen bestimmte Suchbegriffe in deutscher Sprache verwendet wurden. Wir sind also alle über unsere Suchabfragen an der sozialen Vergrößerung bzw. Verkleinerung bestimmter Risiken beteiligt. Als 2005/06 die sogenannte Vogelgrippe (H5N1) diskutiert wurde, haben wir alle Informationen zu dieser Viruserkrankung gegoogelt. Im Jahre 2009 war das Thema, das unsere Aufmerksamkeit absorbierte, die Schweinegrippe. Die Dinge, die für jeden von uns vermutlich viel gefährlicher waren, sind und sein werden, haben wir hingegen verhältnismäßig wenig gegoogelt – beispielsweise Herzkrankheit, Schlaganfall und Brustkrebs (alle drei gehörten 2011 laut Gesundheitsberichterstattung des Bundes zu den zehn häufigsten Todesursachen in Deutschland). Das zeigt, dass wir als Nutzer der Medien und des Internets aktiv zu einer sozialen Vergrößerung oder Verkleinerung bestimmter Risiken und ihrer Wahrnehmung und Einschätzung beitragen.

4. Wie „schlägt“ unsere subjektive Risikowahrnehmung auf den Klimawandel an?

Unsere subjektive Risikowahrnehmung orientiert sich also nicht nur am objektiven Risiko. Kann man nun – nachdem die subjektive Risikowahrnehmung und die psychologischen Faktoren, die sie beeinflussen, besser verstanden sind – vorhersagen, wie Menschen bestimmte Risiken einschätzen oder einschätzen werden, zum Beispiel jene Risiken, die der Klimawandel mit sich bringt? Nehmen Menschen den Klimawandel allein schon deshalb als gefährlich wahr, weil es sich um ein relativ neues, unbekanntes Phänomen handelt? Oder schätzen Menschen ihn als weniger risikoreich ein, weil viele seiner Auswirkungen beobachtbar sind und sie um die Gefährdungen wissen?

Leider gibt es darauf keine einfache Antwort. Der Grund dafür ist, dass die Beurteilung des Klimawandels sehr stark davon abhängt, wie er kognitiv repräsentiert wird. Erscheint einer Person der Klimawandel als ein neuartiges, unbekanntes Phänomen, von

dem sie zudem glaubt, dass es katastrophale Konsequenzen nach sich ziehen wird, dann wird der Klimawandel sehr wahrscheinlich als gefährlich und risikoreich wahrgenommen. Das gleiche Phänomen kann aber von einer anderen Person kognitiv auch völlig anders repräsentiert werden. Klimawandel könnte auch als eine Fortschreibung bekannter Wetterphänomene verstanden werden, nach dem Motto: Es wird ein bisschen wärmer, es wird ein bisschen mehr regnen, und die Stürme werden etwas stärker ausfallen. In diesem Fall handelt es sich beim Klimawandel um ein eher vertrautes Phänomen, das mit einiger Wahrscheinlichkeit nicht als höchst gefährlich und risikoreich wahrgenommen wird. Diese unterschiedlichen kognitiven Repräsentationen und divergierenden Risikowahrnehmungen wären eng verknüpft mit dem Ruf nach Regulierung und Risikoreduktion oder dessen Ausbleiben.

Die Frage der kognitiven Repräsentation ist leider nicht die einzige Problematik, die es schwierig macht vorherzusagen, wie Menschen das Risiko des Klimawandels beurteilen und beurteilt werden. Es gibt noch eine andere Problematik. Und für diese andere Problematik müssen wir darüber reden, wie Menschen eigentlich von Risiken erfahren, d. h. auf welche Weise Menschen Kenntnis von ihnen erlangen.

4.1 Zwei Wege, Kenntnis von Risiken zu erlangen: Deskription versus Erfahrung

Es gibt diverse Arten, wie wir über die unzähligen Risiken des Lebens Kenntnis erlangen. Eltern warnen uns vor heißen Herdplatten und heranbrausenden Autos. Der Biologielehrer warnt uns vor den Gefahren ungeschützten Geschlechtsverkehrs. Straßenschilder warnen uns vor herabstürzenden Gesteinsbrocken. Broschüren des Gesundheitsamtes warnen uns vor den Gefahren der Alkoholsucht. Ungeachtet dieser diversen Informationskanäle kann man aber folgende prinzipielle Unterscheidung treffen: Kenntnis von Risiken kann man durch Beschreibung des Risikos oder durch die Erfahrung des Risikos erlangen (HERTWIG und EREV 2009).

Vor einigen Jahren konnte man diese Überschrift in einer großen Boulevardzeitung lesen: „Schweinegrippe – Professor befürchtet in Deutschland 35.000 Tote!“ Das ist eine Form von Deskription, d. h. die symbolische Repräsentation einer Information über ein Risiko. Durch diese Beschreibung kann ich Informationen über das Ereignis „Schweinegrippe“ erlangen, ohne dass ich mich persönlich dem Risiko ausgesetzt habe oder aussetzen muss. Die Deskription des Risikos muss nicht immer so marktschreierisch stattfinden wie in dem Fall der Boulevardzeitung. Ein anderes Beispiel für die Deskription eines Risikos konnte man in *DIE ZEIT* vom 17. März 2012 (Nr. 12) finden. Vor dem Hintergrund der nuklearen Katastrophe in Fukushima behandelte ein Beitrag von Fritz VORHOLZ das Thema Sicherheit von deutschen Atomkraftwerken. Es hieß dort: „Bei einer durchschnittlichen Kernschmelzhäufigkeit von beispielsweise 1 zu 100.000 pro Anlage und Jahr – das ist ein mittlerer Wert der in der internationalen Risikoforschung genannten Bandbreite – ergibt sich in einem Zeitraum von 60 Jahren eine Wahrscheinlichkeit von einem Prozent, dass sich in einem der 17 deutschen Kernkraftwerke ein Super-GAU ereignet.“ Ein Prozent innerhalb von 60 Jahren – auch das ist eine Form der Deskription, hier der Beschreibung des Restrisikos der deutschen Kernkraftwerke.

Zuletzt noch ein Beispiel für die Deskription eines Risikos, das die deutsche Öffentlichkeit 2012 sehr beschäftigt hat: Jenes Risiko, welches Eltern in Kauf nehmen, die aus religiösen oder anderen Gründen ihre männlichen Nachkommen beschneiden lassen. Bro-

schüren der Gesundheitsämter haben das Ziel, den Leser über Risiken aufzuklären. Sie tun dies zwangsläufig auf dem Wege der Deskription. Zu dem Thema „Beschneidung“ gibt es zum Beispiel eine Broschüre des *New York City Health Departments* mit dem Titel „Before the bris: How to protect your baby against infection“.⁷ Sie wendet sich unter anderem an jüdische Eltern, die sich mit der Frage beschäftigen, welchen potenziellen Risiken ihr Baby durch eine Beschneidung ausgesetzt wird. Die Broschüre informiert, dass eine bestimmte rituelle Form der Beschneidung – das *Metzitzah B'peh*, in dem Mund und Lippen des Mohel direkt mit der Schnittstelle in Kontakt kommen – das Risiko einer Ansteckung mit dem Herpes-Virus HSV-1 mit sich bringt. Laut Auskunft der Broschüre kann dieser Virus zu einer HSV-1-Infektion führen, die wiederum ernsthafte gesundheitliche Konsequenzen haben kann. Diese können bis zu einer Hospitalisierung reichen und im schlimmsten Fall auch zum Tod des Babys führen.

Deskription ist ein wichtiger Weg, auf dem Menschen Kenntnis und Informationen über Risiken erlangen können. Direkte Erfahrung ist ein anderer Weg. Lassen Sie uns beim vorangegangenen Beispiel bleiben. Die folgende Aussage stammt aus einem Interview mit Omar KEZZE in der Wochenzeitung *DIE ZEIT* (MUSHARBASH 2012). Dort sagte er: „Ich habe viele Beschneidungen durchgeführt.“ Omar KEZZE ist jener Chirurg, der in Köln an einem vierjährigen muslimischen Jungen eine Beschneidung durchgeführt hat. Es kam zu medizinischen Komplikationen. Der Fall wurde dann vor das Kölner Landgericht gebracht, und dieses entschied, dass es sich bei KEZZES Eingriff um Körperverletzung handelte. In letzter Konsequenz hat dieses Urteil damit die uralte Praxis der Beschneidung jüdischer und muslimischer männlicher Nachkommen unter den Verdacht einer Straftat gestellt. Nun, was genau meinte KEZZE mit seiner obigen Aussage? Mit großer Wahrscheinlichkeit wollte er zum Ausdruck bringen, dass es sich bei einer Beschneidung um einen Routineeingriff handelt, den er schon unzählige Male vorgenommen hat, ohne dass es zu nennenswerten Problemen gekommen wäre. Auf der Grundlage seiner Erfahrung ist er davon überzeugt, dass eine Beschneidung einen Eingriff ohne großes Risiko darstellt. Sollte es ausnahmsweise zu Problemen kommen, dann werden diese durch die Erfahrung jener vielen Eingriffe relativiert, die reibungslos abliefen.

Erfahrung und Deskription repräsentieren zwei unterschiedliche Wege, Kenntnis über ein Risiko zu erlangen. KEZZE verlässt sich auf die direkte Erfahrung des Chirurgen, um das Risiko der Beschneidung einzuschätzen. Im Unterscheid zum Chirurgen können Eltern, die eine Beschneidung ihres Kindes in Betracht ziehen, nicht auf direkte Erfahrung rekurrieren. Sie müssen sich auf anderen Wegen informieren, zum Beispiel durch Broschüren, die sie über die möglichen Gesundheitsrisiken einer Beschneidung sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeiten aufklären.

Entscheidend ist nun Folgendes: Viele Untersuchungen zu der Frage, wie Menschen in Anbetracht von Unsicherheit Entscheidungen treffen, haben gezeigt, dass diejenigen, die mittels Deskription von relativ unwahrscheinlichen Risiken erfahren, dazu neigen, diesen mehr Gewicht einzuräumen, als ihnen in Anbetracht ihrer objektiven Wahrscheinlichkeit zukommen sollte (HERTWIG und EREV 2009). Überträgt man diesen robusten Befund auf Eltern, die sich mittels einer Broschüre zu den Risiken einer Beschneidung informieren, dann kann man vermuten, dass sie seltenen Risiken zu viel Bedeutung beimessen werden.

7 <http://www.nyc.gov/html/doh/downloads/pdf/std/before-the-bris-brochure.pdf>.

Sobald aber die Kenntnis unwahrscheinlicher Risiken nicht nur von Beschreibungen herrührt, sondern auch aus eigener Erfahrung stammt, werden sie relativ korrekt eingeschätzt – insbesondere dann, wenn die Erfahrungsstichprobe sehr groß ist. Allerdings ist das nicht zwangsläufig der Fall. Bei sogenannten *Black-Swan-Events* – also bei Ereignissen, die extrem selten sind, sodass sich selbst bei einer großen Erfahrungsstichprobe das Ereignis nicht manifestiert – wird das Risiko eines seltenen Ereignisses untergewichtet. Das heißt also, dass Menschen auf der Grundlage persönlicher Erfahrung Risiken entweder korrekt einschätzen und gewichten oder dazu neigen, dem Risiko ein zu geringes Gewicht einzuräumen. Bei der Deskription kommt es zu dem umgekehrten Phänomen. Hier neigen Menschen dazu, seltenen Ereignissen zu viel Gewicht einzuräumen.

Mit dieser grundlegenden Unterscheidung zwischen Deskription und Erfahrung kann man eine Reihe von Verhaltensweisen erklären, die auf den ersten Blick paradox oder unvernünftig erscheinen. Lassen Sie mich das an dem Verhalten derjenigen illustrieren, die in unmittelbarer Nähe des Vesuvs, des einzigen noch aktiven Vulkans auf dem europäischen Kontinent, leben.

4.2 Der Vesuv und die Schwierigkeit, ein Black-Swan-Risiko zu kommunizieren

Dieser Vulkan ist uns allen ein Begriff. Die Auslöschung der römischen Stadt Pompeji unter den Lavamassen des Vesuvs im Jahre 79 nach Christus hat sich fest in das kollektive Gedächtnis der Menschheit eingegraben. Allerdings war dieser Ausbruch des Vesuvs keineswegs der größte. Es kam schon in der Bronzezeit, 3780 vor Christus, zu einem noch viel massiveren Ausbruch. Diese Eruption in der Bronzezeit und ihre archäologischen „Fußspuren“ wurden in den letzten Jahren sorgfältig von einer Gruppe von Vulkanologen untersucht (MASTROLORENZO et al. 2006), weil er möglicherweise eine Blaupause dafür liefert, was passieren könnte, wenn der Vesuv erneut ausbräche.

Abbildung 8 zeigt den „Fallout“ der damaligen Eruption, der die Region über viele Jahrhunderte unbewohnbar gemacht hat. Die Karte zeigt auch den Einzugsbereich von Neapel, der weltweit größten Metropole in der Nähe eines noch aktiven Vulkans. Dieses Gebiet wurde von einem bis zu drei Meter hohen Mantel aus Asche und Lava bedeckt. Warum eignet sich diese frühere Eruption des Vesuvs eher als Blaupause für das mögliche Ausmaß eines zukünftigen Ausbruchs als die von 79 nach Christus? Der Grund besteht darin, dass nach den Meinungen diverser Experten die Magmakammern heute sehr hoch angefüllt sind. Seismische Daten lassen darauf schließen, dass es ein mindestens 400 Quadratkilometer großes Magmareservoir unter dem Vulkan gibt (AUGER et al. 2001). Ein zukünftiger Ausbruch würde vermutlich einen sehr viel größeren Fallout zur Folge haben als der Ausbruch, der Pompeji zerstörte.

Zumindest einige Vulkanologen sind der Meinung, dass man mit Sicherheit davon ausgehen kann, dass es in der Zukunft zu einem Ausbruch des Vesuvs kommen wird. Unklar sei lediglich, wann dieser passieren wird. Der isländische Wissenschaftler Haraldur SIGURÐSSON vertritt zum Beispiel die Meinung: „Die Katastrophe kann in ein paar Jahrhunderten kommen – oder in ein paar Monaten“ (HÜRTER 2003). Wir wissen also nicht, wann der Vesuv ausbrechen wird. Aber man kann schon relativ präzise vorhersagen, wie die Konsequenzen aussähen – gesetzt den Fall, die Blaupause stimmt. In einem Radius von zwölf Kilometern um den Vulkan herum würde es zu einer vollständigen Zerstörung

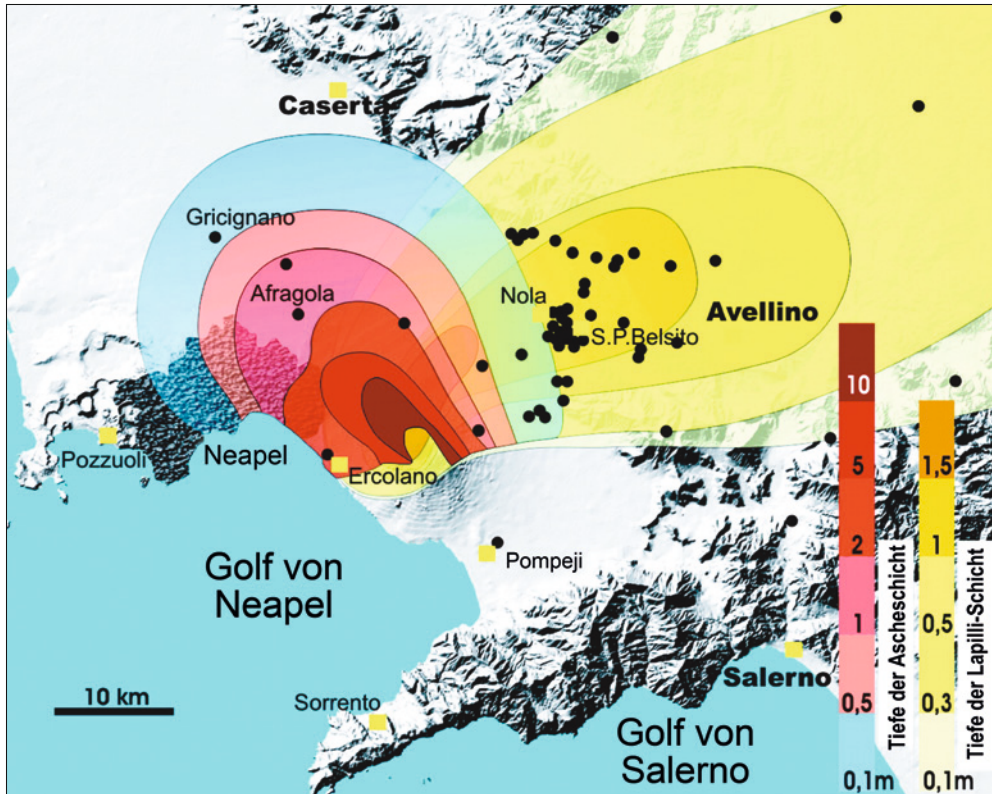


Abb. 8 Auswirkungen der Eruption des Vesuvus in der Bronzezeit 3780 v. Chr. Die schwarzen Punkte markieren archäologische Ausgrabungsstätten. Diese Orte wurden unter Vulkanemissionen begraben. In einem Umkreis von 12 km um den Vesuv (dunkelrote Zone) wurde alles von der herabrollenden Lavamasse fortgeschwemmt, während die weiter entfernten Landstriche von einer dezimeter- (hellrote Zone) bis zentimeterhohen (blaue Zone) Ascheschicht bedeckt wurden. Im Besiedlungsraum der heutigen Stadt Neapel waren die Ablagerungen des Ausbruchs bis zu 3 m dick (die Werte in den Balken sind Meterangaben). Quelle: MASTROLORENZO et al. 2006, modifiziert.

kommen (MASTROLORENZO et al. 2006), was nichts anderes bedeutet, als dass substantielle Teile von Neapel dem Erdboden gleichgemacht würden.

Und hier kommt das Paradox: Alle bisherigen Versuche der italienischen Regierung, die Anwohner angesichts der drohenden Gefahr umzusiedeln, sind völlig erfolglos geblieben. Warum ist das so? Eine Erklärung, die man hören kann, ist die, dass die Bewohner das Risiko einfach verleugnen. Ein Journalist der *New York Times*, der sich über das Verhalten der Neapolitaner erstaunt zeigte, schrieb zum Beispiel: „In the shadow of Vesuvius, those residents have cultivated [...] a form of denial as deep as the earth’s molten core“ (BRUNI 2003). Das ist eine mögliche Sichtweise. Eine andere Sichtweise macht Gebrauch von der Unterscheidung zwischen Deskription und Erfahrung. Die Bewohner Neapels verfügen auf der einen Seite über Risikoinformation durch deskriptive Risikowarnungen – die Aussagen der Experten, die prognostizieren, dass der Vulkan irgendwann und möglicherweise sogar in

der nahen Zukunft wieder ausbrechen könnte und dass die Konsequenzen katastrophal wären. Gleichzeitig verfügen sie aber auch über die unmittelbare persönliche Erfahrung, in der Nähe des Vulkans zu leben. Diese Erfahrung sagt etwas anderes. Sinngemäß vermittelt sie: Wir wohnen hier seit Monaten, seit Jahren oder möglicherweise seit Jahrzehnten, und noch nie ist irgendetwas passiert. Und in der Tat: Der letzte, kleinere Ausbruch des Vulkans fand im Jahr 1944 statt. Das heißt, viele gegenwärtig in der Region lebende Neapolitaner haben noch nie eine Eruption des Vulkans erlebt. Sie haben die Erfahrung gemacht, dass sie tag-ein, tagaus in ihrer Heimatstadt leben können, ohne dass die Katastrophe eingetreten wäre. Bislang ist ihnen das von den Experten befürchtete und durch den Informationskanal der Deskription kommunizierte *Black-Swan*-Ereignis erspart geblieben.

Sollte diese Erklärung richtig sein, dann offenbart sie auch ein echtes Dilemma der Risikokommunikation. Warnungen vor Risiken erfolgen häufig in Gestalt von Deskription (z. B. Warnhinweise vor Nebenwirkungen in Beipackzetteln; Gesundheitsbroschüren, die vor Alkoholmissbrauch, ungeschütztem Geschlechtsverkehr oder den Folgen von Adipositas warnen). Diese Aussagen müssen nicht selten mit Erfahrungen der Rezipienten der Warnhinweise konkurrieren, die das Risiko weniger dramatisch erscheinen lassen, weil es nur selten oder weil es zeitlich verzögert auftritt. In diesem Konkurrenzverhältnis zwischen Deskription und Erfahrung um Einfluss auf unsere Aufmerksamkeit, unser Verhalten und unsere Entscheidungen hat die sprachliche oder symbolische Beschreibung nicht notwendigerweise die besseren Karten (BARRON et al. 2008).

4.3 *Von der Schwierigkeit, die Risiken des Klimawandels zu kommunizieren*

Die Unterscheidung zwischen Deskription und Erfahrung hilft auch zu verstehen, warum die Kommunikation der Risiken des Klimawandels eine große Herausforderung darstellt. Risikokommunikation über dieses Phänomen ist unter anderem deshalb so schwierig, weil für viele Menschen Erfahrung und Deskription noch auseinanderklaffen. Menschen machen die Erfahrung, dass der Klimawandel zwar stattfinden mag – er findet jedoch nicht in ihrer direkten Umgebung statt und (noch) nicht auf eine Art und Weise, die sie unmittelbar, wiederholt und direkt erfahren könnten. Der für die meisten Mitteleuropäer sichtbarste Klimawandel findet in den Warnungen der Klimaexperten statt; er wird in wissenschaftlichen Journalen und Büchern behandelt; er wird in den Medien diskutiert und veranschaulicht. Aber unmittelbar erfahrbar scheint er vor allem an den Randregionen der Welt zu sein, und sollte er irgendwann einmal auch Mitteleuropa massiv beeinträchtigen oder eine Veränderung der Lebens- und Konsumgewohnheiten erzwingen, dann in der Zukunft – nicht hier und heute. Mit anderen Worten: Ein schwieriges Hindernis in dem Bemühen, die Risiken des Klimawandels zu kommunizieren, besteht in der (noch existierenden) Divergenz zwischen Deskription und Erfahrung. Da es so scheint, dass persönliche und unmittelbare Erfahrung einen stärkeren Einfluss als Expertenprognosen und -aussagen auf unsere subjektive Risikowahrnehmung, unser Verhalten und Entscheiden hat, finden diese weniger Resonanz, als man erhoffen oder erwarten könnte.

Erfahrungen, die sich zu verändern beginnen, können allerdings schnell dazu führen, dass die Karten neu gemischt werden. Das Bewusstsein für das Phänomen Klimawandel und seine weitreichenden Konsequenzen und die Bereitschaft, auch kostspielige Maßnahmen zu ergreifen, nimmt zu, sobald Menschen die Konsequenzen des Klimawandels unmittelbar zu spüren bekommen. Welche starken Impulse unmittelbare Erfahrungen ge-

ben können, kann man z. B. in den US-amerikanischen Bundesstaaten Florida und Alaska beobachten. Dort erfahren viele Menschen die Konsequenzen des Klimawandels – z. B. den verheerenden Wirbelsturm Katrina in Florida oder das merklich veränderte Klima in Alaska – direkt und unmittelbar. Und die Bereitschaft, sich mit den Konsequenzen des Klimawandels auseinanderzusetzen und persönliches Verhalten zu ändern, ist in diesen Regionen sehr viel höher als in anderen Bundesstaaten der USA (WEBER und STERN 2011).

4.4 Noch eine Schwierigkeit: Der Klima-Analphabetismus

Leider ist die häufig bestehende Divergenz zwischen Deskription und Erfahrung nicht das einzige Problem, das die Risikokommunikation der Konsequenzen der globalen Erwärmung zu einem schwierigen Geschäft macht. Es gibt ein Phänomen, das man mit dem Begriff „Climate illiteracy“ umschreiben könnte (WEBER und STERN 2011). Er beschreibt einen Zustand kollektiver Unwissenheit oder äußerst lückenhaften Wissens über bestimmte Zusammenhänge und Dynamiken im Kontext des Klimawandels. Viele von uns verfügen über falsche oder zumindest unvollständige kognitive Repräsentationen des Klimawandels sowie des komplexen Zusammenhangs zwischen unserem Handeln und dem Klimawandel. Es ist beispielsweise für viele Menschen sehr schwierig nachzuvollziehen, was die nichtlineare Beziehung zwischen CO₂-Emissionen auf der einen Seite und der Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre auf der anderen Seite bedeutet. Viele Menschen unterschätzen zum Beispiel systematisch, wie viel Reduktion von CO₂-Emissionen notwendig ist, um den Gehalt von CO₂ in der Atmosphäre zumindest konstant zu halten (STERMAN und BOOTH SWEENEY 2007). Auch das Phänomen der Irreversibilität – bestimmte Dinge oder Entwicklungen können ab einem gewissen Punkt nicht mehr rückgängig gemacht werden – ist schwer zu verstehen (WEBER und STERN 2011). Diese und ähnliche Befunde sprechen dafür, dass unsere kognitiven Modelle im Hinblick auf Wettergeschehen, globales Klima und nicht-lineare Prozesse in diesem Geschehen lückenhaft und wohl auch fehlerhaft sind. Wir sind alle ein Stück weit Klima-Analphabeten. Risikokommunikation hat daher nicht nur die Aufgabe, vor risikoreichen Entwicklungen zu warnen, sondern müsste, um die gesteckten Ziele zu erreichen, auch Wissen und Bildung vermitteln.

Doch damit nicht genug. Es gibt noch andere Probleme, von denen ich eines wenigstens kurz erwähnen möchte. In nicht wenigen Gesellschaften gibt es ein weitverbreitetes Misstrauen gegenüber Wissenschaft und Wissenschaftlern. In den USA zum Beispiel bringen 30% der Bevölkerung der Wissenschaft wenig oder kein Vertrauen entgegen (WEBER und STERN 2011). Risikokommunikation, die wissenschaftliche Befunde, Prognosen und Interpretationen kommuniziert, kann natürlich nur in dem Maße wirksam werden, in dem der Wissenschaft, deren Einsichten kommuniziert werden sollen, ein vernünftiges Maß an Vertrauen entgegengebracht wird.

5. Schlussfolgerung

Die moderne psychologische Forschung zur Risikokommunikation ist eine Erfolgsgeschichte. Heute kann diese Forschung evidenzbasierte Empfehlungen dazu geben, wie Risiken des Alltags – z. B. medizinische Risiken, aber auch statistische Informationen wie genetische Evidenz im Gerichtssaal – transparent und verständlich kommuniziert werden können.

Die positiven Wirkungen, die man sich von einer erfolgreichen Kommunikation objektiver Wahrscheinlichkeiten und Konsequenzen erhoffen kann – etwa eine höhere Kompetenz, mit Unsicherheit umzugehen –, stoßen aber auch an Grenzen. Eine dieser Grenzen besteht darin, dass sich die Dinge, die uns ängstigen, nicht auf ihr objektives Risiko reduzieren lassen. Mindestens zwei andere Eigenschaften eines Risikos führen dazu, dass es – ungeachtet seines objektiven Risikos – mehr oder weniger ängstigt.

Neben der Dimension alt *versus* neu (oder vertraute *versus* unvertraute Risiken) ist die zentrale psychologische Dimension das Ausmaß, in dem ein Ereignis als unkontrollierbar und potenziell verheerend für viele Menschen wahrgenommen wird. Auf solche *Dread*-Risiken reagieren Menschen sehr viel stärker und häufig mit Vermeidungsverhalten (GAISSMAIER und GIGERENZER 2012). Im Unterschied dazu haben Menschen im Schnitt weniger Angst vor Risiken, bei denen viele Menschen, verteilt über einen längeren Zeitraum, auf unspektakuläre Weise umkommen. Wir vermeiden den Urlaub und das Reisen mit dem Flugzeug in Länder, die von terroristischen Anschlägen heimgesucht wurden – Krankenhäuser hingegen, ein vergleichsweise gefährlicher Ort, an dem wir uns mit gefährlichen Keimen infizieren könnten, vermeiden wir als Patienten kaum. Menschen haben vor bestimmten Risiken mehr Angst als vor anderen, unabhängig vom objektiven Risiko. Daher muss erfolgreiche Risikokommunikation mehr können, als nur über objektive Risiken aufzuklären. Sie muss durch das Verständnis der psychologischen Hintergründe der Risikowahrnehmung den Menschen dabei helfen, mit diesen Ängsten kompetent umzugehen.

Ein weiteres Hindernis, das sich der erfolgreichen Risikokommunikation in den Weg stellen kann, ist die mögliche Diskrepanz zwischen Deskription und Erfahrung. Warnungen vor potenziellen Risiken nehmen häufig die Gestalt von Berichten, Statistiken, Wahrscheinlichkeiten und mehr oder weniger abstrakten Beschreibungen der möglichen Konsequenzen risikoreicher Verhaltensweisen an. Warnungen repräsentieren die kollektive Erfahrung vieler, die dem Einzelnen zur Verfügung gestellt wird. Wie wirksam die Warnungen sind, hängt unter anderem davon ab, ob sie in Konkurrenz zu anderslautenden Erfahrungen des Einzelnen stehen. Treten die negativen Konsequenzen risikoreicher Aktivitäten sehr selten oder mit großer Zeitverzögerung auf, dann klaffen direkte Erfahrung und Deskription auseinander. Erinnern wir uns an die Bewohner von Neapel, deren tagtägliche Erfahrung sie eine andere Lektion lehrt als die düsteren Warnungen der Vulkanologen.

Die Konsequenzen des globalen Klimawandels sind für die Mitteleuropäer noch relativ begrenzt, und das Signal des veränderten Wettergeschehens ist relativ schwer zu trennen von den Zufallsschwankungen des normalen Wettergeschehens um den zentralen Trend (WEBER und STERN 2011). Daher treffen auch hier die Warnungen und Prognosen der Experten auf eine Erfahrungswelt, die anderes sagt. Das heißt im Umkehrschluss natürlich nicht, dass Aufklärung und Information keine wichtigen Werkzeuge wären, um Staatsbürger in die Lage zu versetzen, informiert mit Risiken in einer modernen Gesellschaft umzugehen. Aber es wäre naiv zu glauben, dass Aufklärung und Information, Deskription objektiver Risiken also, in jedem Fall dazu führen, dass Menschen ihr Verhalten ändern. Der Klimawandel stellt auch die Wissenschaft der Risikokommunikation vor große Herausforderungen.

Literatur

- AUGER, E., GASPARINI, P., VIRIEUX, J., and ZOLLO, A.: Seismic evidence of an extended magmatic sill under Mt. Vesuvius. *Science* 294, 1510–1512 (2001)
- BARRON, G., LEIDER, S., and STACK, J.: The effect of safe experience on a warnings' impact: Sex, drugs, and rock-n-roll. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 106, 125–142 (2008)
- BRUNI, F.: Who's afraid of Vesuvius? (Pompeii is history). *The New York Times* 27.08.2003
- COUMOU, D., and RAHMSTORF, S.: A decade of weather extremes. *Nature Climate Change* 2, 491–496 (2012)
- DECONCINI, C., and TOMPKINS, F.: Fact sheet 2012: A year of record-breaking extreme weather & climate. World Resources Institute 1-4 (2013)
- GAISSMAIER, W., and GIGERENZER, G.: 9/11, act II: A fine-grained analysis of regional variations in traffic fatalities in the aftermath of the terrorist attacks. *Psychol. Sci.* 23, 1449–1454 (2012)
- GIGERENZER, G.: Das Einmaleins der Skepsis: Über den richtigen Umgang mit Zahlen und Risiken. Berlin: Berlin Verlag 2002
- GIGERENZER, G., GAISSMAIER, W., KURZ-MILCKE, E., SCHWARTZ, L. M., and WOLOSHIN, S.: Helping doctors and patients make sense of health statistics. *Psychological Science in the Public Interest* 8, 53–96 (2007)
- GIGERENZER, G., and HOFFRAGE, U.: How to improve Bayesian reasoning without instruction: Frequency formats. *Psychol. Rev.* 102/4, 684–704 (1995)
- HERTWIG, R., and EREV, I.: The description-experience gap in risky choice. *Trends Cogn. Sci.* 13, 517–523 (2009)
- HOFFRAGE, U., LINDSEY, S., HERTWIG, R., and GIGERENZER, G.: Medicine – Communicating statistical information. *Science* 290, 2261–2262 (2000)
- HÜRTER, T.: Der Jahrtausendknall. *Die Zeit*, 10.04.2003
- KERLIKOWSKA, K., GRADY, D., BARCLAY, J., SICKLES, E. A., and ERNSTER, V.: Effect of age, breast density, and family history on the sensitivity of first screening mammography. *J. Amer. Med. Assoc.* 276, 33–38 (1996)
- MASTROLORENZO, G., PETRONE, P., PAPPALARDO, L., and SHERIDAN, M. F.: The Avellino 3780-yr-B.P. catastrophe as a worst-case scenario for a future eruption at Vesuvius. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103, 4366–4370 (2006)
- MUSHARBASH, Y.: Die Operation war einwandfrei. *Die Zeit*, 12.07.2012
- National Climatic Data Center: National Overview – Annual 2012. <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/national/2012/13> (Stand: 11.03.2013)
- The New York City Department of Health and Mental Hygiene: Before the Bris. How to Protect your Baby against Infection. <http://www.nyc.gov/html/doh/downloads/pdf/std/before-the-bris-brochure.pdf> (Stand: 11.03.2013)
- Robert-Koch-Institut: Zum Welt-AIDS-Tag 2010. *Epidemiol. Bull.* 46, 453–462 (2010)
- SLOVIC, P.: Perception of risk. *Science* 236, 280–285 (1987)
- SLOVIC, P.: The Perception of Risk. London: Earthscan Publications 2000
- Statistisches Bundesamt: Verkehr–Verkehrsunfälle 2011. Fachserie 8 Reihe 7. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2012
- STERMAN, J. D., and BOOTH SWEENEY, L.: Understanding public complacency about climate change: Adults' mental models of climate change violate conservation of matter. *Climatic Change* 80, 213–238 (2007)
- WEBER, E. U., and STERN, P. C.: Public understanding of climate change in the United States. *Amer. Psychol.* 66, 315–328 (2011)
- WEGWARTH, O., and GIGERENZER, G.: Risiken und Unsicherheiten richtig verstehen lernen. *Dt. Ärztebl.* 108, A448–A451 (2011a)
- WEGWARTH, O., and GIGERENZER, G.: Nutzen und Risiken richtig verstehen. *Dt. Ärztebl.* 108, A568–A570 (2011b)

Dr. Ralph HERTWIG
Max-Planck-Institut für Bildungsforschung
Lentzeallee 94
14195 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 82406202
Fax: +49 30 8249939
E-Mail: sekhertwig@mpib-berlin.mpg.de

Die europäische Zahlungsbilanzkrise¹

Hans-Werner SINN (München)

Mit 5 Abbildungen und 1 Tabelle



¹ Der Artikel basiert auf dem Buch *Die Target-Falle: Gefahren für unser Geld und unsere Kinder* (München: Hanser 2012) sowie auch auf Textteilen, die den folgenden Beiträgen entlehnt sind: SINN 2012b und SINN und WOLLMERSHÄUSER 2012. Die Daten sind aktualisiert und entsprechen dem Kenntnisstand vom November 2012.

Zusammenfassung

Die Europäische Währungsunion steckt in einer schweren inneren Zahlungsbilanzkrise. Die sogenannten Peripherieländer, insbesondere Griechenland, haben zunehmende Probleme, ihre Staatshaushalte zu finanzieren. Um einzelne Euroländer vor der Zahlungsunfähigkeit zu retten, sind verschiedene Rettungsmaßnahmen eingeführt worden, die unter dem Begriff „Euro-Rettungsschirm“ zusammengefasst werden. Hinzu treten aber die Käufe von Staatspapieren und die Möglichkeit der Selbsthilfe durch Geldschöpfung, die das EZB-System den Krisenländern zu Lasten der anderen Euro-Länder gewährt. Die daraus bei der Bundesbank aufgelaufenen Target-Forderungen umfassen die Hälfte des Nettoauslandsvermögens der Bundesrepublik Deutschland und stellen die deutsche Beteiligung an den offiziellen Rettungspaketen in den Schatten. Bis November 2012 belief sich die Haftung Deutschlands aus allen Rettungsschirmen für den Fall eines kumulativen Zahlungsausfalls der GIPS-Länder, Italiens und Zyperns auf etwa 743 Mrd. Euro. Über den weitaus größten Teil dieser Haftungssumme hat nicht der Bundestag entschieden, sondern letztlich der EZB-Rat.

Es handelt sich bei den Geschehnissen in der EZB nicht mehr um normale Begleiterscheinungen eines Währungssystems, sondern um das Ergebnis eines Systemfehlers, der im US-amerikanischen Finanzsystem durch die Notwendigkeit der Bezahlung von Target-Salden mit marktfähigen Wertpapieren ausgeschlossen ist. In seinem Beitrag zeigt Hans-Werner SINN, warum dieser Fehler eine Bedrohung für die Bundesrepublik Deutschland darstellt, die zu Konzessionen bei Verhandlungssystemen über Rettungsschirme zwingt.

Abstract

The European Monetary Union is currently experiencing a serious internal balance-of-payment crisis. The so-called periphery countries, and especially Greece, are finding it difficult to finance their national budgets. Various bail-out measures have been introduced to save individual Eurozone countries from insolvency, which are collectively referred to as the “euro bail-out package”. In addition to this package, however, there have been purchases of government bonds and the option for countries to help themselves *via* money creation, which the ECB System grants crisis-hit countries at the expense of the other euro countries. About half of Germany’s net foreign wealth is now a Target claim of the *Bundesbank* against other central banks in Europe. To November 2012, Germany’s overall exposure in the case of a cumulative default on the part of the GIPS countries, Italy and Cyprus totaled around EUR 743 billion taking all bailout packages into consideration. In the end, the ECB Council, and not German parliament, was responsible for deciding how to dispose of most of this sum.

The steps taken by the ECB are not merely the side-effects of a monetary system, but are the result of a system failure, which is precluded in the US financial system where Target claims must be settled with marketable securities. In his article, Hans-Werner SINN shows why this system failure poses a threat to Germany, and is forcing it to make concessions in negotiations over bail-out packages.

1. Eine Einführung

Die Europäische Währungsunion steckt in einer schweren inneren Zahlungsbilanzkrise, die in wichtigen Aspekten der Krise des Bretton-Woods-Systems² in den Jahren vor seinem Untergang ähnelt. Zur Bekämpfung der Krise haben die Staaten der Eurozone riesige Kreditmengen aktiviert. Vorher schon hat aber die Bundesbank, besichert durch das EZB-System,³ Target-Kredite in einem Umfang an die Länder der Peripherie des Euroraums geben müssen, die die deutsche Beteiligung an den offiziellen Rettungspaketen in den Schatten stellt. Diese Kredite belaufen sich mittlerweile auf 719 Mrd. Euro. Das ifo Institut hat dazu in den letzten Monaten mehrere Texte veröffentlicht.⁴ Dieser Beitrag legt dar, was unter den sogenannten Target-Salden zu verstehen ist und wie sie entstehen konnten. Des Weiteren zeigt er, warum die Target-Kredite als Drohpunkt bei den Verhandlungen über offene Rettungssysteme wirken. Der Beitrag schließt mit einer Empfehlung, dass Regeln zur Tilgung der Target-Salden nach dem Muster der USA zu entwickeln sind.

2. Target-Salden – Der Sachverhalt

Hinter Target-Salden verbergen sich Refinanzierungskredite der nationalen Notenbanken. Ein Refinanzierungskredit ist ein Kredit, den eine nationale Notenbank den Geschäftsbanken ihres Hoheitsgebiets gegen Sicherheiten mit neu geschaffenem Geld gewährt und den diese Geschäftsbanken dann an ihre Kundschaft weiterreichen können. Der Kredit ist zumeist mit einer sehr kurzfristigen Laufzeit ausgestattet – ein paar Tage bis zu maximal drei Monaten waren früher üblich – und muss laufend erneuert werden. Die nationale Notenbank, in Deutschland also die Bundesbank, schafft das benötigte Geld aus dem Nichts, verleiht es den Banken ihres Hoheitsgebietes, die es haben wollen, gegen Zinsen und schreibt es ihnen auf dem Girokonto gut, das sie bei der Notenbank unterhalten.

Normalerweise besorgt sich eine Bank das Geld, das sie selbst an ihre Kunden verleiht, von den Sparern oder von anderen Finanzinstituten, die es sich zuvor bei den Sparern geliehen haben. Das Geld kommt also aus der privaten Wirtschaft und fließt wieder dahin zurück. Das Problem ist nur, dass in einer wachsenden Wirtschaft ein immer größerer Bestand an Geld für die allgemeinen Transaktionen benötigt wird, weil immer ein Teil des Geldes unterwegs ist und in irgendwelchen Portemonnaies temporär herumliegt. Daher muss jedes Jahr in Proportion zur nominal wachsenden Wirtschaftsleistung zusätzliches Geld geschaffen und über einen Verleih an die Geschäftsbanken in den privaten Geldkreislauf gebracht werden. Der Bestand an Refinanzierungskrediten, der hinter der wachsenden, in der Wirtschaft zirkulierenden Zentralbankgeldmenge steht, muss also ständig erhöht werden. Das verschafft der Notenbank laufend mehr Zinseinnahmen, die sie dann an den Staatsetat abführen muss.⁵

2 Als Bretton-Woods-System bezeichnet man das bis 1973 geltende Festkurssystem zwischen den USA und Europa. Siehe auch Fußnote 18.

3 EZB – Europäische Zentralbank.

4 Vgl. z. B. SINN 2011a, b, c, d; SINN und WOLLMERSHÄUSER 2012, ausführlichere Vorfassungen erschienen in SINN und WOLLMERSHÄUSER 2011a, b).

5 Die deutschen Zinserträge aus den Refinanzierungskrediten sind übrigens unter dem Euro gegen den Trend gerechnet kleiner geworden, weil die Sondergewinne, die die Bundesbank aufgrund der weiten Verbreitung der D-Mark in Osteuropa und der Türkei erzielt hatte, mit dem Euro sozialisiert wurden. Vgl. SINN und FEIST 1997.

Insofern scheinen Target-Salden also auf den ersten Blick nichts Besonderes zu sein. Es handelt sich dabei jedoch um einen Überlauf an Zentralbankkrediten über jenes Maß hinaus, das der Geldversorgung im Inneren eines Landes dient. Dieser Überlauf wird von der Wirtschaft des jeweiligen Landes benutzt, im Ausland Güter und Vermögensobjekte zu kaufen sowie Schulden zu tilgen. Insofern bedeuten die Target-Salden sehr wohl etwas grundsätzlich anderes, als die nationale Wirtschaft mit einem Bestand an Transaktions- oder Tauschmitteln zu versorgen, der von Konto zu Konto läuft und als Bodensatz an Liquidität immer irgendwo in diesem Land herumliegt. Sie führen nämlich tatsächlich zu einem Nettozufluss an Konsumgütern, Investitionsgütern, Vermögensobjekten und Schuldscheinen, inklusive der eigenen, die man früher im Zuge einer Kreditaufnahme ausgab, aus anderen Ländern.

Dass es zu dem Abfluss an Liquidität kam, der den Zufluss der genannten Objekte ermöglichte, ist das unmittelbare Ergebnis der Absenkung der Sicherheitsstandards für die Pfänder, die Geschäftsbanken bei ihren Notenbanken für Refinanzierungskredite hinterlegen mussten. In ihrem ökonomischen Kern messen die Target-Salden deshalb öffentliche internationale Kredite, die nichts anderes sind als die öffentlichen Rettungskredite EFSF, ESM⁶ und wie sie alle heißen, über die die Parlamente Europas unter großen Mühen abgestimmt haben. Diese Kredite sind auch nichts anderes als die Staatspapierkäufe des EZB-Systems. Die Unterschiede liegen allein in der Verbuchung in den Kontensystemen des Staates, nicht in der ökonomischen Substanz.

2.1 Die Target-Salden und die Zahlungsbilanzungleichgewichte

Zahlungen zwischen den Banken des Euroraums werden über die Zentralbanken der einzelnen Länder abgewickelt, die einander Zahlungsaufträge erteilen. Normalerweise halten sich die Zahlungsaufträge die Waage. Wenn sich beispielsweise eine griechische Bank in Deutschland Geld leiht, kommt es zu einer Überweisung von Deutschland nach Griechenland. Dabei kreditiert die griechische Zentralbank der griechischen Geschäftsbank den Betrag im Auftrag der Bundesbank. Und wenn dann in Deutschland mit dem geliehenen Geld ein VW gekauft werden soll, dann muss die Bundesbank der Geschäftsbank von VW den Kaufpreis kreditieren. Eine Situation, bei der solche Zahlungsaufträge sich die Waage halten, nennt man Zahlungsbilanzgleichgewicht.

Halten sie sich nicht die Waage, entstehen Salden, die im sogenannten Target-System als Forderungen und Verbindlichkeiten der Notenbanken verbucht werden. Dabei steht Target für ein Akronym, das aus den Anfangsbuchstaben einer komplexen Wortfolge gebildet wurde, die das Zahlungssystem des Eurosystems bezeichnen soll.⁷ Demnach ist ein Target-Defizit einer nationalen Notenbank ein Nettoabfluss an Geld aus dem Land, zu dem diese Notenbank gehört, oder das, was die Ökonomen ein Zahlungsbilanzdefizit nennen, und entsprechend ist ein Target-Überschuss ein Nettozufluss an Geld oder ein Zahlungsbilanzüberschuss.

6 EFSF – Europäische Finanzstabilisierungsfazilität, ESM – Europäischer Stabilisierungsmechanismus.

7 Target steht für *Trans-European Automated Real-time Gross Settlement Express Transfer System*. Manchmal wird statt von Target auch von Target2 gesprochen. Der Unterschied ist hier nicht relevant. Target2 wurde 2007 eingeführt. Beginnend mit der Einführung des Euro, gab es aber zuvor schon ein Target-System ohne Bezifferung. Das alte System wurde nur für Großbetragsüberweisungen verwendet, das neue lässt auch kleinere Zahlungen zu. Da die Saldierung der Zahlungsströme früher vornehmlich durch private Verrechnungsstellen innerhalb der Länder durchgeführt wurde, waren damals die Bruttogeldströme kleiner. Für die sich ergebenden Salden im internationalen Zahlungsverkehr ist diese Unterscheidung aber belanglos.

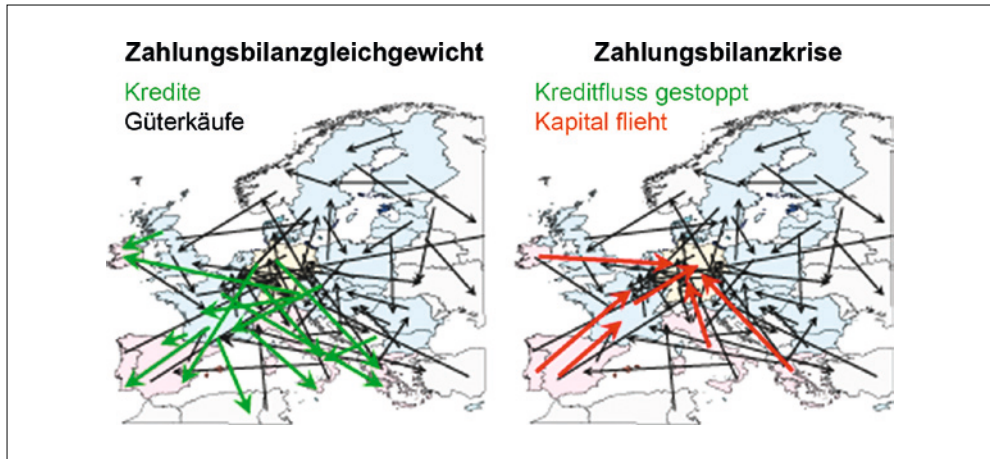


Abb. 1 Zahlungsbilanzgleichgewicht und -krise. Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 1 verdeutlicht die Interpretation der Zahlungsbilanz in schematischer Form anhand von Pfeilen, die Zahlungsströme verdeutlichen sollen. Die schwarzen Pfeile sollen den Geldfluss für Güterkäufe symbolisieren, die grünen den Geldfluss aufgrund von Krediten. Es gibt Geldflüsse innerhalb der Länder und grenzüberschreitende Geldflüsse.

Das linke Bild stellt die Situation vor der Krise dar. Es zeigt, dass die Länder der südlichen Peripherie des Euroraums vor der Krise Nettoempfänger von Krediten waren. Dorthin richten sich viele grüne Pfeile, die von den Kernländern Europas kommen. Zurück in die Kernländer sind schwarze Pfeile gerichtet, die den Geldfluss in diese Länder zum Zweck des Güterkaufs verdeutlichen.

Das rechte Bild zeigt die Krise. In der Krise versiegt der Kreditfluss vom Kern in die Peripherie, was sich daran zeigt, dass die grünen Pfeile fehlen. Es kam zu einem Nettoabfluss von Geld von der Peripherie in den Kern, weil die Güterkäufe weitergingen, aber der Kreditfluss zu ihrer Finanzierung fehlte.

Mehr noch, da viele Kreditgeber ihre schon ausstehenden Kredite nicht mehr verlängerten und die Rückzahlung verlangten, flossen zudem auch Geldbestände für die Tilgung ab, ohne dass Ersatzkredite verfügbar waren, die neues Geld hätten bringen können. Dies ist in der rechten Abbildung durch die roten Pfeile veranschaulicht. Es fand eine Kapitalflucht statt. Das Kapital, das vom Kern in die Peripherie verliehen worden war, floh, so rasch es die Fristigkeit der Kredite zuließ, in die Heimatländer zurück. Das erzeugte den deutschen Investitionsboom und speziell den Bauboom nach der Krise.

Nennenswerte Ungleichgewichte ergaben sich erst nach dem August 2007, weil damals der europäische Interbankenmarkt das erste Mal in Unordnung geriet. Weil die Banken Frankreichs, Deutschlands und der Niederlande ihre Kredite nur noch zögerlich ins Ausland vergaben, mussten die GIPSZ-Länder (Griechenland, Irland, Portugal, Spanien, Zypern),⁸

⁸ Im Folgenden steht GIIPSZ für die sechs Krisenländer mit Italien und GIPSZ mit nur einem „I“ für die Krisenländer ohne Italien. Analog steht GIIPS für die Krisenländer ohne Zypern und GIPS für die Krisenländer ohne Zypern und Italien.

die allesamt große Defizite in der Leistungsbilanz⁹ hatten, ihre Güterkäufe durch die Hergebe von Geld finanzieren, ohne dass ihnen in entsprechendem Umfang Geld aus dem Ausland zufließt, und sie haben die Geldverluste durch die (elektronische) Notenpresse ersetzt. Im Falle Irlands und seit dem Sommer 2011 auch Spaniens und Italiens kam es sogar zu einer Kapitalflucht, in dem Sinne, dass die Banken der europäischen Kernländer ihre dorthin verliehenen Kreditbestände repatriierten.¹⁰ Seit dem Zeitpunkt floss Geld aus den GIPSZ-Ländern heraus, während in Deutschland, den Niederlanden, Finnland und Luxemburg wachsende Geldmengen anlandeten. Bis zum Oktober 2012 war Deutschland per Saldo ein Geldbestand von 719 Mrd. Euro zugeflossen. In den Niederlanden waren bis zum September 119 Mrd. Euro, in Finnland 71 Mrd. Euro und in Luxemburg 120 Mrd. Euro angelandet (vgl. Abb. 2).

Zahlungsbilanzungleichgewichte wie zwischen den Ländern der Eurozone resultieren letztlich aus dem Zusammenschluss von unabhängigen Staaten mit unterschiedlichen nationalen Zinsen in einem Festkurssystem. Die unterschiedlichen Zinsen führen zu Spannungen, die die Nettogeldflüsse verursachen, wenn die EZB den Banken die Finanzmittel zu günstigeren Bedingungen zur Verfügung stellt, als es der Kapitalmarkt tut, wenn sie sich also entweder mit einer unzureichenden Besicherung der vergebenen Kredite begnügt oder mit einem Zins zufrieden gibt, der, gemessen an den Risiken dieser Kredite, zu niedrig ist.

Obwohl die Target-Salden Zahlungsbilanzsalden sind, messen sie auch Kredite zwischen den Notenbanken. Das ist auf den ersten Blick nicht offenkundig, denn normalerweise ist mit der Vergabe eines Kredits auch eine Übergabe von Geld verbunden. Man fragt sich also, wo und wie etwa die Bundesbank der griechischen Zentralbank Geld gegeben hätte. Das hat sie natürlich nicht. Das Kreditverhältnis entsteht vielmehr dadurch, dass beim Kauf einer deutschen Ware durch einen Griechen die Bundesbank eine von der griechischen Zentralbank in Auftrag gegebene Überweisung durchführt. Die Bundesbank muss nämlich der inländischen Geschäftsbank des deutschen Verkäufers eine Gutschrift erteilen, die für sie selbst eine Schuld gegenüber dieser Bank darstellt. Die Bundesbank gibt also der griechischen Zentralbank einen Kredit, weil sie in deren Auftrag eine Zahlung durchführt. Es ist, als ob ich für meinen Freund, der sein Portemonnaie vergessen hat, eine Handwerkerrechnung bezahle. Ich gebe ihm durch die Ausführung der Zahlung an seiner Stelle einen Kredit und erwerbe dadurch eine Forderung gegen ihn.

9 Es ist aufschlussreich, die internationalen Zahlungsvorgänge nach Zahlungen im Rahmen der Leistungsbilanz und der Kapitalbilanz (im weiteren Sinne: Vermögenserwerb und Finanzgeschäfte) zu unterscheiden. In der Leistungsbilanz werden Transaktionen im Zusammenhang mit dem Erwerb von Gütern aus laufender Produktion, Dienstleistungen einschließlich der Zinsen für Kreditgeschäfte sowie Geschenke erfasst. Die Kapitalbilanz misst demgegenüber Zahlungen im Zuge des Tausches von Vermögenstiteln, vor allem zumeist die Entstehung oder Tilgung von Krediten. Danach liegt ein Zahlungsbilanzgleichgewicht vor, wenn Kapitalbilanz und Leistungsbilanz einander ausgleichen, und ein Ungleichgewicht, wenn sie es nicht tun. Ein Zahlungsbilanz- oder Target-Defizit lässt sich dann als jener Teil des Leistungsbilanzdefizits definieren, der nicht durch Nettokapitalimporte finanziert ist, oder, algebraisch äquivalent, als die Summe aus dem Leistungsbilanzdefizit und dem Nettokapitalexport, dem Defizit der Kapitalbilanz.

10 Die Kapitalflucht bestand im Wesentlichen darin, dass Banken der europäischen Kernländer zurück in den sicheren Heimathafen geflohen sind. Sie verlangten die vertraglich vorgesehene Tilgung von kurzfristigen Krediten, die sie ausgereicht hatten, ohne der Ablösung der alten Kredite durch neue Kredite zuzustimmen. Man holte das verliehene Geld zurück, so schnell es eben ging. Außerdem ist freilich Vermögen geflohen, das den in diesen Ländern ansässigen Vermögensbesitzern selbst gehörte: Sie haben im großen Stil ihre Wertpapiere an die Banken ihrer Heimatländer verkauft und den Erlös dann ins Ausland getragen.

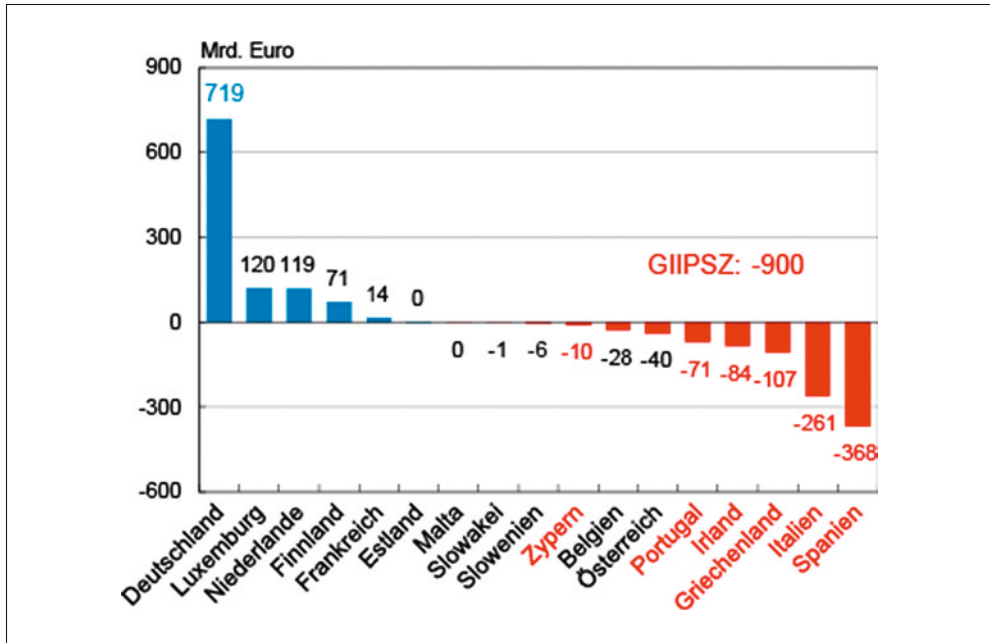


Abb. 2 Die Target-Salden nach Ländern* (Kenntnisstand November 2012) *Ende Oktober 2012 für Deutschland, Italien und Spanien; Rest Ende September 2012. Quelle: SINN und WOLLMERSHÄUSER 2011a (Abb. 1, Fortschreibung)

Der Unterschied ist nur, dass mein Freund mir das Geld am Abend zurückgibt, während die Target-Forderungen im Prinzip unbegrenzt stehen bleiben und niemals fällig gestellt werden. Griechenland bezieht also die Ware und lässt anschreiben, ohne selbst eine Ware zurückliefern zu müssen. Und es geht nicht nur um Waren. Es ist egal, was in Deutschland mit dem Geld, das die Bundesbank dem Verkäufer gutschreibt, erworben wird. Ob es eine Ware oder ein Wertpapier, eine Immobilie oder eine mittelständische Firma ist oder ob es nur ein Schuldschein ist, den man zurückkauft, indem man seine Schuld tilgt. Der Vorgang als solcher ist immer derselbe.

Die Analogie zum Freund passt auch insofern nicht, als ich mich jederzeit entscheiden kann, ob ich meinem Freund aus seiner Bredouille helfe oder nicht. Beim Target-Kredit hat die Bundesbank hingegen keinerlei individuelle Entscheidungsfreiheit. Sie kann natürlich im EZB-Rat, wie sie es ja tut, für eine restriktivere Besicherungspolitik bei der Kreditgewährung und Geldschöpfung der griechischen Nationalbank stimmen, aber dort wird sie laufend überstimmt und kann wenig ausrichten.¹¹ Sie muss die Zahlungen, die durch die

¹¹ Der EZB-Rat besteht aus den 17 Präsidenten der Notenbanken der Eurostaaten (also pro Land eine Stimme unabhängig von der Größe) und den vier bis sechs Mitgliedern des Direktoriums, die vom Europäischen Rat mit qualifizierter Mehrheit gewählt werden. Die Direktoriumsposten sind keinem Land zugeordnet. Während Entscheidungen zur Geschäftsordnung mit der Mehrheit der Haftungsanteile zu treffen sind, werden die operativen Entscheidungen, auch jene zur Absenkung der Sicherheitsstandards, mit einfacher Mehrheit getroffen. Länder wie Deutschland, die Niederlande und Luxemburg, denen erhebliche Haftungsrisiken aufgebürdet wurden, können die Entscheidungen des EZB-Rates deshalb nicht verhindern.

großzügige Kreditpolitik induziert und ermöglicht wurden, ausführen und kann sich nicht verweigern. So ist nun mal das Eurosystem. Durch die Absenkung der Standards für die Besicherung von Refinanzierungskrediten (vgl. Tab. 1) hat der EZB-Rat finanzschwachen Ländern die Möglichkeit gegeben, sich den Überziehungskredit quasi aus dem Kassenautomaten zu ziehen, ohne dass die Bank, in diesem Fall die Bundesbank, in der Lage wäre, ein Limit einzuziehen.

Tab. 1 Veränderungen der EZB-Bonitätsanforderungen. Quelle: Eigene Darstellung

Datum	Änderung der Anforderungen
15. Oktober 2008	Bonität der Pfänder wird von A- auf BBB- gesenkt
3. Mai 2010	Kein Mindestrating für griechische Staatspapiere
31. März 2011	Kein Mindestrating für irische Staatspapiere
7. Juli 2011	Kein Mindestrating für portugiesische Staatspapiere
8. Dezember 2011 und 20. Juni 2012	Nicht-handelbare ABS-Papiere werden als Pfänder akzeptiert
9. Februar 2012	Titel aus Unternehmenskrediten werden als Pfänder akzeptiert

Die Bundesbank erhält übrigens für die Durchführung der Transaktion zunächst eine bilaterale Forderung gegenüber der griechischen Zentralbank, während die griechische Zentralbank eine entsprechende Verbindlichkeit gegenüber der Bundesbank eingeht. Das so entstandene bilaterale Schuldverhältnis ist aber nur von kurzer Dauer, denn es wird jeweils einmal am Tag in ein Schuldverhältnis gegenüber dem System der europäischen Zentralbanken verwandelt. So entstehen durch die netto über die Grenzen gestromten Gelder Target-Forderungen und Target-Verbindlichkeiten in den Bilanzen der nationalen Notenbanken.

Da es sich bei den Target-Beständen um Kredite handelt, ist es nur konsequent, dass sie verzinst werden. Weniger einsichtig ist, dass sie nur zum jeweiligen Hauptrefinanzierungssatz verzinst werden, also dem Zins, zu dem auch die Geschäftsbanken die mit frischem Geld ermöglichten Refinanzierungskredite von der jeweiligen nationalen Zentralbank erhalten.¹² Bis zum Oktober 2008 lag dieser Zins bei 4,5%, doch dann wurde er schrittweise gesenkt und erreichte im Mai 2009 ein Niveau von nur noch 1%. Seit dem 11. Juli 2012 liegt er bei nur noch 0,75%. Die letztgenannten Werte liegen weit unter der durchschnittlichen Inflationsrate des Euroraums, die in den Jahren 2008 bis 2011 etwa 2% betrug und zuletzt einen Wert von etwa 2,5% erreichte. Die Zinsen werden jährlich den Beständen zugeschlagen und in das kommende Jahr übertragen. Die Zinsen sind irrelevant, solange alle Staaten des Eurosystems solvent bleiben, weil Zinslasten und Zinseinnahmen zwischen den Notenbanken nach ihren Kapitalschlüsseln umverteilt werden. Sie spielen aber eine Rolle, sofern ein Staat in die Insolvenz geht oder aus dem Eurosystem austritt, weil sie dann in die Gesamtmenge der Restforderungen gegen diesen Staat eingehen.

12 Antwort 2011/003864 der Bundesbank auf Anfrage des ifo Instituts vom 11. März 2011 und Schreiben der EZB an das ifo Institut vom 15. März 2012. In Artikel 2 Absatz 1 des nicht öffentlichen Beschlusses EZB/2007/NP10 über die Verzinsung von Intra-Eurosystem-Nettosalden heißt es: „Intra-Eurosystem-Nettosalden [...] werden zu dem aktuellen marginalen Zinssatz verzinst, der vom Eurosystem bei seinen Tendern für Hauptrefinanzierungsgeschäfte gemäß Anhang I Abschnitt 3.1.2 der Leitlinie EZB/2000/7 über geldpolitische Instrumente und Verfahren des Eurosystems verwendet wird.“

2.2 Die Verlagerung des Refinanzierungskredits

Eine weitere, ökonomische Interpretation der Krediteigenschaft ergibt sich durch den Umstand, dass der durch die Target-Salden gemessene Geldfluss zwischen den Ländern durch eine Verlagerung der Refinanzierungskredite des Notenbanksystems quasi automatisch sterilisiert wird. In den Defizitländern, aus denen das Geld abfließt, haben die Geschäftsbanken immer mehr Refinanzierungskredit aus dem Zentralbanksystem gezogen, um die Liquiditätsverluste auszugleichen, und in den Überschussländern, denen das Geld zufließt, war es umgekehrt. Dort haben die Geschäftsbanken ihre Nachfrage nach Refinanzierungskrediten zurückgefahren und zunehmend auch Geld an die nationalen Notenbanken verliehen, weil sie mehr davon hatten, als sie ihren Kreditkunden hätten leihen können. Wegen der Sterilisierung haben die massiven Geldströme weder den Trend der aggregierten Geldmenge noch die Verteilung der Geldmenge im Euroraum verändert.¹³ So gesehen messen die Target-Salden tatsächlich auch die Verlagerung des Zentralbankkredits und der Geldschöpfung zwischen den nationalen Notenbanken und den entsprechenden Volkswirtschaften des Euroraums.¹⁴

Abbildung 3 verdeutlicht die Kreditverlagerung, indem sie die prozentuale Aufteilung der Zentralbankgeldmenge des Euroraums nach ihrem Aufenthaltsort und nach ihrer Herkunft darstellt. Die Kurven zeigen die Monatsendwerte der jeweiligen Bilanzposten der nationalen Notenbanken. Die grüne Kurve zeigt die Entwicklung der in den GIIPS-Ländern vorhandenen Geldbasis, also des dort zirkulierenden Zentralbankgeldbestandes seit dem ersten Krisenjahr.¹⁵ Die Geldbasis eines Landes ist hier definiert als die Summe aus dem Bargeld, das die Notenbank dieses Landes ausgegeben hat, und den Sichteinlagen, die die Geschäftsbanken bei der Notenbank halten und für Überweisungen zwischen den Banken benötigen. Die Einlagefazilität und die Termineinlagen, die beide bis zum Juli 2012 verzinslich waren, werden hier nicht zur Geldbasis gezählt.

Das abgeflossene Zentralbankgeld selbst wird in der Abbildung durch die Differenz zwischen der oberen roten Kurve und der grünen Kurve dargestellt, denn die rote Kurve gibt an, wie viel Geld in den GIIPS-Ländern ursprünglich geschaffen wurde. Die Differenz zwischen dem Geld, das in den Ländern ursprünglich geschaffen wurde, und dem Geld, das dort zirkuliert, ist offenbar in die anderen Euroländer gewandert (im Folgenden als Kernländer bezeichnet). Es zirkuliert dort als Außengeld. Sein Bestand wird durch die Target-Salden gemessen.

Mit dem Begriff „ursprünglich geschaffen“ ist in erster Linie die Geldschöpfung durch Refinanzierungskredite gemeint, also auch das Geld, von dem die nationalen Notenbanken der GIIPS-Länder aufgrund der Absenkung der Sicherheitsstandards immer mehr haben schaffen und an die Geschäftsbanken ihres Hoheitsgebiets verleihen können. Zu dem ursprünglich geschaffenen Geld gehört aber auch jenes Geld, das durch den Kauf von Aktiva, die im Besitz der Geschäftsbanken waren, in Umlauf gekommen ist. Die letztgenannte Komponente der Geldschöpfung wird jeweils durch die getönten Flächen dargestellt. Dabei steht der Begriff „andere Aktiva“ für die Nettogröße aller anderen Bestände

¹³ Vgl. SINN und WOLLMERSHÄUSER 2011a (Abb. 8).

¹⁴ Diese Interpretation wurde erstmalig in SINN 2011c gegeben.

¹⁵ Zypern ist nicht dabei, weil es für dieses Land keine Daten gibt. Das macht aber nichts, weil es nur 0,6% der Wirtschaftskraft der Eurozone verkörpert.

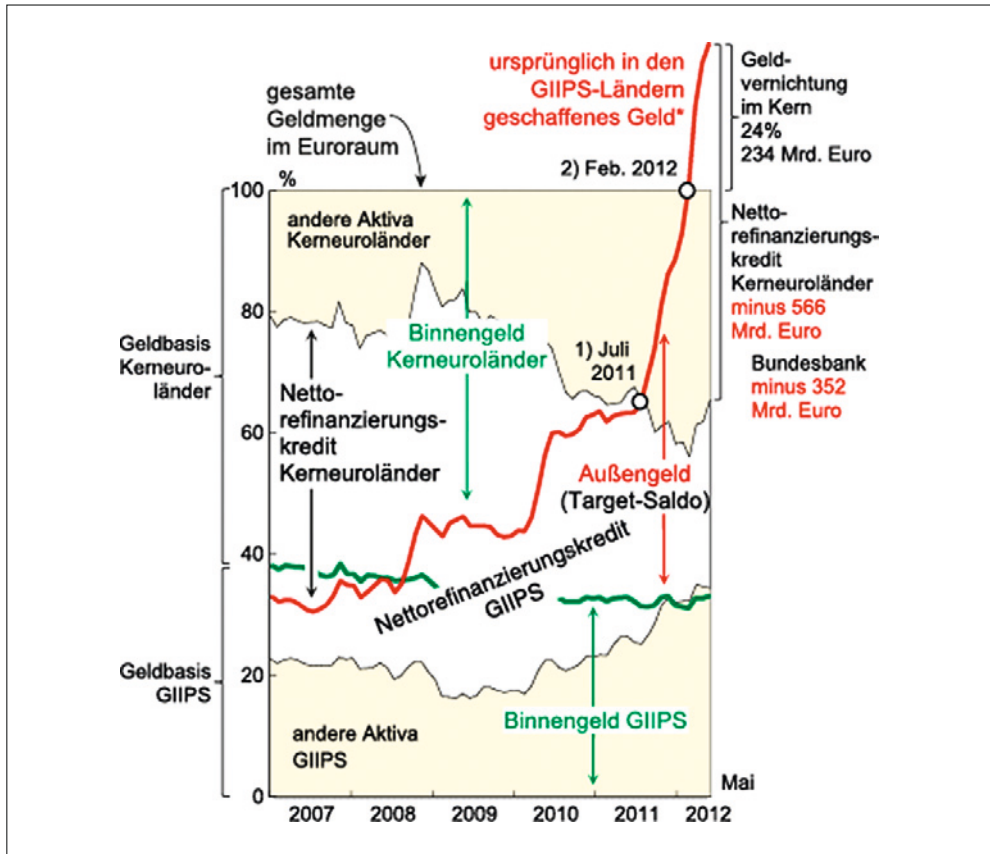


Abb. 3 Die Verlagerung des Zentralbankkredits durch die Geldabflüsse (Januar 2007 – Mai 2012).
 (1) Nettorefinanzierungskredit in den Kernländern verschwindet.
 (2) Binnengeld in den Kernländern verschwindet.

*geschaffen durch Refinanzierungskredite oder den Erwerb von Aktiva im Geschäftsbankensektor.

Hinweis: Die Zentralbankgeldmenge ist hier unter Abzug der Einlagefazilität definiert, und der Nettorefinanzierungskredit ist gleich dem Bruttorefinanzierungskredit abzüglich der Einlagefazilität und der Dreimonatskredite, die die Geschäftsbanken ihren Zentralbanken geben.

Quelle: SINN und WOLLMERSHAUSER 2011a (Abb. 9, Fortschreibung)

von Vermögensobjekten in den Bilanzen der Notenbanken. Die Breite der unteren getönten Fläche zeigt den Teil der Geldmenge, der durch den Erwerb von solchen Aktiva in den GIIPS-Ländern entstand, und die Breite der oberen getönten Fläche zeigt den Teil der Geldmenge, der auf ähnliche Weise in den Kernländern entstand. Die Refinanzierungskredite, die in den GIIPS-Ländern beziehungsweise im Kern vergeben wurden, werden demgemäß durch den Abstand von der roten Linie bis zur jeweiligen getönten Fläche gemessen.

Abbildung 3 gibt der bisherigen Analyse der Target-Salden eine tiefere ökonomische Interpretation. Diese Salden sind nicht nur Kredite, weil zum Beispiel die Bundesbank im Auftrag ausländischer Notenbanken Inländern Gutschriften für irgendwelche Leistungen

ihrer Firmen und Bürger erteilt, die dem Ausland gewährt wurden. Das sind sie natürlich unmittelbar, und deshalb messen sie den grenzüberschreitenden Überlauf des Geldes präzise, jedenfalls soweit er elektronisch stattfindet. Aber es kann keinen Überlauf von Geld geben, wenn nicht nachgedruckt wird. Indirekt messen die Target-Salden deshalb auch den Nachdruck des Geldes und damit vor allem die zusätzliche Vergabe von Refinanzierungskrediten über die Eigenversorgung der Länder mit Liquidität hinaus, die durch die Absenkung der Standards für die Qualität der Pfänder für Refinanzierungskredite ermöglicht wurde und den Bürgern der bedrängten Länder die Möglichkeit gab, sich weiterhin Güter im Ausland zu kaufen, Auslandsvermögen zu erwerben und ihre Außenschulden zu tilgen.

Die Refinanzierungskredite sind in der Abbildung als Nettogrößen unter Abzug möglicher Einlagen und Anlagen der Banken bei den jeweiligen nationalen Notenbanken definiert. Ob die zufließende Liquidität durch die Verringerung des Refinanzierungskredits an die Geschäftsbanken abgeschöpft wird oder dadurch, dass die Notenbanken sich selbst bei den Geschäftsbanken verschulden, ist einerlei. Das ist ökonomisch fast derselbe Vorgang.

Der Target-Saldo ist der Abstand zwischen der roten und der grünen Linie, ausgedrückt als Prozentsatz der Zentralbankgeldmenge. Er kann sowohl als Target-Schuld der GIIPS-Länder als auch als Target-Forderung der Kernländer interpretiert werden. Wie bereits erwähnt, misst er das Außengeld, das in den GIIPS-Ländern geschaffen wurde, doch nun in den Kernländern zirkuliert.

Die Abbildung 3 impliziert, dass das vom Süden in den Norden wandernde Geld die im Norden durch Refinanzierungskredite oder Wertpapierkäufe geschaffene Geldmenge eins zu eins verdrängt hat.

Dies ist keine Verdrängung durch eine Angebotsbeschränkung auf dem Kreditmarkt, wie gelegentlich von Kommentatoren gemutmaßt wurde, sondern eine Verdrängung durch die Beschränkung der Nachfrage nach Liquidität.¹⁶ Die Wirtschaft in den Kernländern braucht in Abhängigkeit von ihrem Aktivitätsniveau immer nur eine begrenzte Menge an Liquidität in Form von zirkulierendem Zentralbankgeld. Strömt dieses Geld bereits über die Markttransaktionen gen Norden, dann fließt dort entsprechend viel zu den Notenbanken und wird wieder sterilisiert, indem bei den dortigen Notenbanken weniger Refinanzierungskredit nachgefragt oder mehr Geld angelegt wird.

Die Abbildung zeigt, dass noch Mitte des Jahres 2007, als die amerikanische Finanzkrise Europa ansteckte, etwas mehr Geld in den GIIPS-Ländern zirkulierte, als dort geschaffen worden war. Nach den ersten Störungen des Interbankenmarktes im Sommer des Jahres 2007 verminderte sich der leichte Überhang aber rasch, weil immer mehr Geld aus diesen Ländern abfloss, und schon ab Mitte 2008 wurde aus dem Überhang ein Defizit. Es baute sich seitdem in den Kernländern ein wachsender Bestand an Außengeld auf, das aus den GIIPS-Ländern kam und das in den Kernländern geschaffene Geld verdrängte.

16 In der Volkswirtschaftslehre gibt es eine lange Debatte um die Verdrängungseffekte, die eine keynesianische Politik der Staatsausgabenerhöhung auslösen könnte. Am Beginn dieser Debatte steht das Argument von Milton FRIEDMAN, dass nützliche öffentliche Güter private Güter zurückdrängen, weil sie Substitute der privaten Güter sind. Als Beispiel führte FRIEDMAN die freie Schulspeisung an, die die Ernährung der Kinder durch die Eltern verdränge, weil die Nachfrage nach Essen begrenzt sei. Es ist genau diese Verdrängung durch die Begrenzung der Nachfrage, die durch das hereindringende Target-Geld hervorgerufen wird. Eine ausführliche Diskussion dazu gibt es in SINN und WOLLMERSHÄUSER 2011a.

Den ersten öffentlichen Hinweis auf die Existenz der Target-Kredite gab es im Februar 2011.¹⁷ Damals hatte sich für Deutschland schon ein Außengeldbestand von über 300 Mrd. Euro aufgebaut, der den Refinanzierungskredit bereits größtenteils verdrängt hatte. Vollends verdrängt wurde dieser Kredit, wie die Abbildung anhand des Punktes (I) zeigt, im Juli 2011. Aus dem Süden war so viel Geld überwiesen worden, dass die Banken des Nordens alle Refinanzierungskredite damit getilgt hatten. Die selbst in den Kernländern geschaffene Geldmenge hatte ihren Ursprung nur noch in Käufen von Wertpapieren, Gold und anderen Aktiva.

Aber die Entwicklung setzt sich weiter fort, indem der Nettorefinanzierungskredit negativ wurde. Das sieht man in der Abbildung daran, dass die rote Kurve rechts vom Punkt (I) in den getönten Bereich hineinstößt. Die Notenbanken der Kernländer hörten nicht nur auf, Refinanzierungskredite zu vergeben, sondern verschuldeten sich immer mehr bei den Geschäftsbanken ihrer Gebiete, um das überschüssige Geld abzuschöpfen, das aus dem Süden herbeigeströmt war. Die Target-Salden explodierten geradezu. Im Mai 2012 lag das Niveau der Nettoschulden der Zentralbanken der Kernländer bei ihren Geschäftsbanken bei 566 Mrd. Euro. Davon entfielen allein auf die Bundesbank 352 Mrd. Euro.

Im Februar 2012 wurde die Schallmauer durchbrochen. Zu diesem Zeitpunkt war der Nettorefinanzierungskredit der Kernländer durch das aus dem Süden zuströmende Geld so stark negativ geworden, dass er sogar jenen Teil der Binnengeldmenge der Kernländer vernichtete, der von den Notenbanken dieser Länder durch den Nettoankauf anderer Aktiva geschaffen worden war. Dieser Punkt wird in Abbildung 3 mit der Ziffer (2) gekennzeichnet. Danach gab es überhaupt keine Euros mehr, die nicht ursprünglich in den GIIPS-Ländern geschaffen worden waren, indem die dortigen Zentralbanken Vermögenswerte erwarben oder Refinanzierungskredite vergaben. Die Zentralbanken des Kerns entwickelten sich vollends zu Einrichtungen zum Schreddern des elektronischen Geldes, das im Süden geschaffen wurde und auf dem Wege des Güterkaufs, der Schuldentilgung und des Erwerbs von Vermögensobjekten in die Kernländer floss. Am aktuellen Rand, im Mai 2012, lag das Volumen des in den Kernländern netto vernichteten Binnengeldes bei 234 Mrd. Euro.

2.3 Der Vergleich mit dem Bretton-Woods-System

Die Bedeutung der Target-Kredite wird auch durch den historischen Vergleich mit dem Bretton-Woods-System deutlich, der Währungsordnung der Nachkriegszeit, die die westlichen Länder einschließlich der Bundesrepublik Deutschland bis 1973 innerhalb eines Goldkernsystems durch feste Kurse miteinander verband.¹⁸

Während der 1960er Jahre waren die USA in diesem System immer teurer geworden, und es bildeten sich immer größere amerikanische Leistungsbilanzdefizite heraus. Die Europäer fanden damals in den USA immer weniger zu kaufen, und die Amerikaner gingen in Europa auf Shopping Tour. Sie kauften alles, ob es nun Firmen, Autos oder Aktien waren. Auch die amerikanischen Touristen, die überall in Europa zu finden waren, sind noch gut in Erinnerung. In dieser Zeit war die amerikanische Notenbank, die Fed, dazu übergegangen, mehr und mehr Dollars zu drucken und an die amerikanischen Banken zu verleihen.

¹⁷ Vgl. SINN 2011a.

¹⁸ Vgl. KOHLER 2011 und BLANKART 2011. Für einen Vergleich mit der Mexiko-Krise siehe: TORNELL und WESTERMANN 2011.

Die zusätzlichen Dollars flossen vornehmlich nach Europa und wurden von den nationalen Notenbanken, die dazu im Festkurssystem verpflichtet waren, gegen heimische Währung umgetauscht. Bei der *Banque de France* und der Bundesbank sammelten sich von Jahr zu Jahr höhere Dollarguthaben an, die zumeist verwendet wurden, um amerikanische *Treasury Bills* zu kaufen.

Durch den Währungsumtausch kamen in Deutschland und Frankreich D-Mark- und Franc-Bestände in Umlauf, denen kein Kreditgeschäft mit den Banken zugrunde lag. Die so geschaffenen „Dollar-D-Mark“ und „Dollar-Franc“, letztlich aus den USA stammendes Außengeld, verdrängten damals das in Umlauf befindliche Binnengeld, das zuhause durch Kredite der Bundesbank oder der *Banque de France* entstanden war. Die Außengeldbestände, die in Deutschland und Frankreich in Umlauf kamen, sind von exakt der gleichen Natur wie die Außengeldbestände, die jüngst aus den GIIPS-Ländern nach Deutschland kamen. Und was damals die Bestände an Dollars und *US-Treasury Bills* bei den europäischen Notenbanken waren, das sind heute die Target-Forderungen der Kernländer des Eurogebiets gegen das Eurosystem.

Auch damals kam es zur Kreditverlagerung zwischen den Ländern, denn während die Bundesbank ihre Refinanzierungskredite sukzessive zurücknehmen musste, war der Geldzufluss aus den USA zustande gekommen, weil die Fed immer mehr Geld gedruckt und Refinanzierungskredite vergeben hatte. Man sagte damals, die Bundesbank habe den Vietnamkrieg mitfinanziert. Heute kann man mit der gleichen Berechtigung sagen, dass die Bundesbank die peripheren Länder des Euroraums mitfinanziert.

Staatspräsident Charles DE GAULLE, dem das Engagement der USA im ehemals französischen Indochina nicht gefiel, hatte 1968 übrigens die Behauptung der USA, die Dollars seien eine Goldkernwährung, wörtlich genommen und den Umtausch der französischen Dollarbestände gegen Gold verlangt. Das war das Ende des Bretton-Woods-Systems, denn da die USA nicht genug Gold gehabt hätten, um alle Umtauschwünsche befriedigen zu können, mussten sie die Golddeckung ihrer Währung aufgeben. Fünf Jahre, nachdem DE GAULLE das Gold von einem Kriegsschiff abholen ließ, war das Bretton-Woods-System zu Ende, und die Wechselkurse bestimmen sich seitdem durch Angebot und Nachfrage auf den Märkten.

Die Bundesbank hatte demgegenüber zugesichert, dass sie ihre Dollarreserven nicht in Gold umtauschen werde.¹⁹ Sie hatte damals allerdings erhebliche Zahlungsbilanzüberschüsse gegenüber den anderen europäischen Ländern angesammelt, die ebenfalls zum Bretton-Woods-System gehörten. Diese Überschüsse wurden größtenteils mit Gold ausgeglichen.²⁰ So akkumulierte die Bundesbank im Bretton-Woods-System bis 1968, als DE GAULLE die französischen Dollarreserven aus den USA zurückholen ließ, einen Goldschatz

19 Vgl. Brief des Präsidenten der Deutschen Bundesbank, Karl BLESSING, vom 30. März 1967, an den Präsidenten der Federal Reserve Bank, Wm. McC. MARTIN, <http://www.mmmnews.de/index.php/gold/7201-der-blessing-brief>.

20 Vgl. NEUMANN 1998, besonders S. 400. Danach musste innerhalb der Europäischen Zahlungsunion (EZU) ein wachsender Teil der bilateralen Defizite nach Wahl der Schuldner in Gold oder Dollar ausgeglichen werden. Nach der Gründung der EZU im Juli 1950 lag der ausgleichende Anteil nur bei 25 %, ab 1954 lag er bei 50 % und ab 1955 bei 75 %. Da in dieser Zeit der Goldpreis auf dem Londoner Markt etwas unter der offiziellen Dollarparität lag, wählte man in der Regel die Bezahlung mit Gold. NEUMANN spricht in diesem Zusammenhang von der „Vergoldung“ der Währungsreserven in der Ära von Bundesbankpräsident VOCKE.

von etwa 3600 t.²¹ Dieser Schatz gehört, bis auf die Abtretung von ungefähr 6 % der Menge an die EZB Anfang 1999,²² noch immer der Bundesbank. Heute verfügt die Bundesbank noch über rund 3400 t Gold, die mit 136 Mrd. Euro etwa 15-mal so viel wert sind wie der damalige Bestand (in absoluten Zahlen ist der Wert des Goldschatzes damit um 127 Mrd. Euro gestiegen).²³ Über die Lagerorte macht die Bundesbank keine detaillierten Angaben. Mehr als zwei Drittel lagern aber wohl bei der *Federal Reserve Bank of New York*, der *Bank of England* und der *Banque de France*, in dieser Reihenfolge.²⁴ Der Goldschatz und die Dollarreserven, die die Bundesbank im Bretton-Woods-System ansammelte, sind das Analogon der Target-Forderungen von heute.

Die Bezahlung von Zahlungsbilanzdefiziten mit echten, fungiblen Vermögenswerten war in der Geschichte immer der Standard unter den Völkern, und wie weiter unten noch dargelegt wird, ist er noch immer der Standard zwischen den Distrikt-Notenbanken des US-Systems. Auch bei dem bis zum Ersten Weltkrieg gültigen Goldstandard wurden Zahlungsbilanzdefizite stets durch Hergabe von Gold ausgeglichen. Das Land, aus dem das Gold abfloss, war zur Kontraktion mit fallenden Preisen gezwungen. Das erhöhte die Wettbewerbsfähigkeit und ließ Leistungsbilanzüberschüsse entstehen, die für sich genommen halfen, die Zahlungsbilanzdefizite wieder abzubauen. Und umgekehrt kam das Land, dem das Gold zufloss, in die Inflation, wodurch seine Wettbewerbsfähigkeit sank und Leistungsbilanzdefizite entstanden, die seinem Zahlungsbilanzüberschuss entgegenwirkten.

Auch im Eurosystem würden solche Kontraktions- und Expansionseffekte ausgelöst, wenn die Bundesbank Gold für ihre Target-Forderungen von den anderen Zentralbanken des Euroraums erhielte. Aber das Recht hat sie nicht, und deswegen endet die Vergleichbarkeit mit Gold- oder Goldkernwährungen an dieser Stelle. Die Defizitländer können ihre Leistungsbilanzdefizite mit der Notenpresse bezahlen, ohne dass eine sichtbare Grenze eingebaut wäre, die diesen Prozess verhindert. Angela MERKEL kann die Target-Forderung der Bundesbank im Gegensatz zu dem, was Charles DE GAULLE gelang, niemals fällig stellen. Die Forderung wächst und wächst, wird mit einem Zins unterhalb der Inflationsrate bedient und wird, wenn überhaupt, erst dann wieder verschwinden, wenn Deutschland den Euroländern andere zinsverbilligte Kreditwege zur Verfügung stellt, die den Wettbewerb mit der Notenpresse bestehen können.

Target-Kredite verringern die Gefährdung des Eurosystems kurzfristig, erhöhen sie aber langfristig. Aus dem Umstand, dass die Bundesbank die Target-Forderungen hinnehmen muss und sie nicht fällig stellen kann, folgt zunächst mehr politische Stabilität bei wachsenden Target-Salden. Der Zusammenbruch nationaler Zahlungssysteme nach einer Verweigerung der Kapitalmärkte wird wirksam verhindert. Indes verringern Target-Kre-

21 Vgl. *Deutsche Bundesbank* 1998a, b. Danach lag der Wert der Goldreserven der Bundesbank 1986 bei etwa 18 Mrd. D-Mark und der Goldpreis bei 5106,33 D-Mark pro kg, woraus sich die Menge von etwa 3600 t ergibt.

22 Es wurden 7 Mio. Feinunzen oder 218 t des Goldschatzes, der Ende 1998 19 Mio. Feinunzen betrug, an die EZB übertragen, vgl. *Deutsche Bundesbank* 2000, besonders S. 182; sowie *Deutsche Bundesbank* 1999, besonders S. 189.

23 Vgl. *Deutsche Bundesbank* 2012a, besonders S. 146; sowie *Deutsche Bundesbank* 2012b und NEUMANN 1998, besonders S. 351; beziehungsweise *Deutsche Bundesbank* 1998a.

24 Vgl. WOLF-DOETTINCHEM und WIECHMANN 2004 und GAUWEILER 2012a. Kritiker befürchten, dass die Bundesbank Schwierigkeiten haben könnte, den Goldschatz im Bedarfsfall einzufordern. Vgl. GAUWEILER 2012b.

dite den Anreiz, strukturelle Reformmaßnahmen zu ergreifen, die die Kreditwürdigkeit eines Landes wieder erhöhen, insbesondere die Flexibilisierung des Arbeitsmarktes, die die Grundvoraussetzung für einen Prozess der realen Abwertung ist, von der allein eine nachhaltige Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit und Leistungsbilanzsalden erwartet werden kann. Deshalb wachsen die Auslandsschulden der Defizitländer immer weiter, die Rückzahlung wird immer unwahrscheinlicher, und der Knall, der entsteht, wenn das System im Endeffekt an der Überdehnung seiner Budgetbeschränkungen zerbricht, wird immer lauter.

Aber auch wenn man den Zusammenbruch des Eurosystems für wenig wahrscheinlich halten mag, ist das, was in diesem Fall passiert, von zentraler Bedeutung für die Verhandlungen über die Rettungspakete, die dazu dienen, gerade diesen Zusammenbruch zu verhindern. Jeder weiß, dass Deutschland vor dem Zusammenbruch Angst haben muss, weil es seine Target-Forderungen verlieren würde. Somit kann Druck auf Deutschland aufgebaut werden, diesen Zusammenbruch durch die Öffnung des deutschen Portemonnaies zu verhindern. Deutschland wird deshalb gezwungen sein, immer umfangreichere Rettungsschirme aufzuspannen.

3. Der heimliche Rettungsschirm im Vergleich zu den offenen Rettungsschirmen

Die offenen Rettungssysteme, die von den Parlamenten Europas mit zum Teil großen Bedenken beschlossen wurden, sind dem versteckten Rettungssystem im EZB-System bei näherem Hinschauen ähnlicher, als man es zunächst vermuten könnte. Natürlich gibt es Unterschiede: Zum einen geht es um die Kredite einer unabhängigen Institution, deren Auftrag die Geldpolitik ist, zum anderen um intergouvernementale Kredite aufgrund zwischenstaatlicher Verträge und Einrichtungen; das eine Mal entscheidet der EZB-Rat, das andere Mal die Parlamente. Aber im Kern geht es in beiden Fällen um eine internationale Kreditvergabe unter öffentlichem Schutz, die die Fähigkeit, ökonomische Ressourcen in Form von Gütern oder Vermögensobjekten zu erwerben, zwischen den Ländern verschiebt. Immer geht es um einen staatlichen Kredit zwischen den Ländern, der den versiegenden privaten Kreditstrom ersetzen soll. Sogar die Haftung für den Fall, dass der Kreditnehmer nicht zurückzahlen kann, ist ähnlich. Wenn das kreditnehmende Land in die Insolvenz geht, kann es die Kredite des Luxemburger Fonds (EFSF bzw. ESM) nicht zurückzahlen, und die anderen Länder tragen die Abschreibungsverluste gemäß ihren EZB-Kapitalanteilen. Nach dieser Regel teilen sich die anderen Länder auch dann die Lasten, wenn ein Staat in die Insolvenz geht und den Euro verlässt oder wenn er im Euro verbleibt und die nationalen Notenbanken samt ihrer Sicherheiten untergehen.

So gesehen hat die EZB mit ihren Target-Krediten schon lange vor der Staatengemeinschaft einen Rettungsschirm aufgespannt, um den bedrängten europäischen Ländern zu helfen. Die nationalen Parlamente der Eurostaaten haben in den Jahren 2010 und 2011 ihre Entscheidungen in dem Bewusstsein getroffen, dass die Peripheriestaaten von einer plötzlichen Kreditkrise erfasst waren und es nötig war, die versiegenden privaten Kreditströme durch öffentliche Kreditströme zu ersetzen. Sie wussten nicht, dass die öffentlichen Kreditströme schon gegen Ende des Jahres 2007 einsetzten. Hätten sie es gewusst, hätten sie sich vielleicht anders entschieden und den Bruch des Maastrichter Vertrages nicht akzeptiert. Dann hätten die nötigen Reformen der Krisenländer schon früher begonnen, und viel-

leicht wäre es Deutschland erspart geblieben, auf dem Wege über intergouvernementale Verträge sukzessive größere Rettungsschirme aufzuspannen.

Bei der Abfassung dieser Zeilen befindet sich die Eurozone bereits im fünften Jahr der öffentlichen Kreditvergabe an die peripheren Länder des Euroraums, nicht erst im zweiten, wie man es bei oberflächlicher Beurteilung des Geschehens vermuten könnte. Was die nationalen Parlamente als kurzfristige Liquiditätshilfen angesehen haben, ist in Wahrheit nur der Anschlusskredit an die Target-Kredite, die die EZB schon viel früher vergab.

3.1 Der Haftungspegel

Abbildung 4 zeigt, welche Volumina bei den Rettungsschirmen insgesamt schon zusammengekommen sind. Die Rettungsmaßnahmen werden in vier Säulen dargestellt. Die erste (linke) Säule zeigt die Beträge, die bereits ausgezahlt wurden, die zweite Säule listet sämtliche zugesagten Hilfszahlungen auf, in der dritten Säule wird das gesamte potenzielle Ausleihvolumen aufgeführt, wie es sich ergibt, seit der ESM-Vertrag Rechtsgültigkeit erlangt hat.

Erfasst sind die Rettungsaktionen und Rettungsschirme der Euroländer, IWF-Kredite,²⁵ EU-Kredite (EFSM),²⁶ die Käufe von Staatspapieren durch die Mitgliedsnotenbanken des EZB-Systems und die Target-Kredite an die Zentralbanken von Griechenland, Irland, Portugal, Spanien, Italien und Zypern. Schließlich werden die Forderungen bzw. Verbindlichkeiten gegenüber dem Eurosystem berücksichtigt, die sich dadurch ergeben, dass die einzelnen Länder *de facto* weniger bzw. mehr Banknoten in Umlauf gebracht haben, als es ihrem Anteil am EZB-Kapital entspricht (unterstes Säulenstück).

In der äußersten rechten Säule steht, was Deutschland im Extremfall einer Insolvenz der Krisenländer und eines Austritts aus dem Euro verlieren würde, falls der Kreditrahmen, wie in der dritten Säule angegeben, ausgeschöpft ist, die Krisenländer nichts zurückzahlen und der Euro an sich überlebt. In diesem Fall erlischt die Rechtsbeziehung des EZB-Systems mit den Geschäftsbanken der Krisenländer. Der Verlust der Zentralbanken der anderen Euroländer ist dann unabhängig von der Frage, ob diese Geschäftsbanken ihre Refinanzierungskredite zurückzahlen, und beschränkt sich auf deren jeweiligen Anteil an den Target-Krediten der Krisenländer und den Anteil an den Staatspapierkäufen. Ferner entstehen anteilige Verluste aus den intergouvernementalen Krediten, den IWF-Krediten und den EU-Krediten.

Im Mai 2010 wurde ein erstes Rettungspaket für Griechenland vereinbart, um eine akute Insolvenz des Landes zu verhindern. Dabei handelte es sich um eine Gemeinschaftsleistung von Euroländern und IWF. Griechenland wurden 80 Mrd. Euro von den Euroländern und 30 Mrd. Euro vom IWF zugesagt. Die Kredite sollten in Abhängigkeit vom Finanzierungsbedarf des griechischen Staates in einzelnen Tranchen ausgezahlt werden. Die Slowakei verweigerte ihre Leistungen von Anfang an. Nach der zweiten Tranche hat Irland und nach der vierten Tranche Portugal die Auszahlung eingestellt, weil sie selber Finanzhilfen in Anspruch nahmen. Dies hatte zur Folge, dass das erste Rettungspaket der Euroländer faktisch nur noch 77,3 Mrd. Euro betrug. Bis Ende 2011 wurden im Rahmen dieses Rettungspakets von den Euroländern Kredite in Höhe von 52,9 Mrd. Euro an Griechen-

25 IWF – Internationaler Währungsfonds.

26 EFSM – Europäischer Finanzstabilisierungsmechanismus.

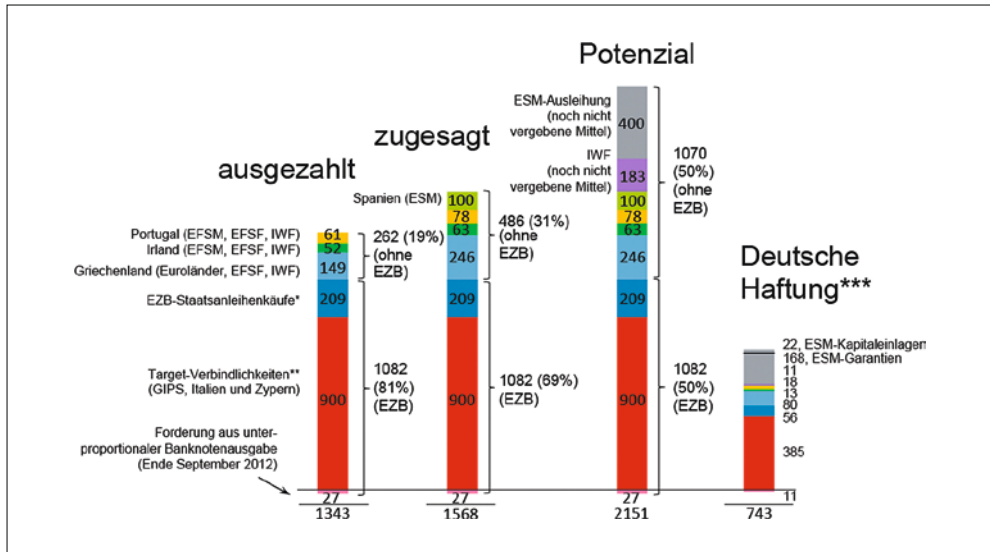


Abb. 4 Die Ausleihsummen für Euroländer (Mrd. Euro).

*Datenstand: 23. November 2012.

**Griechenland, Irland, Portugal, Zypern: Ende September 2012; Italien und Spanien: Ende Oktober 2012.

***Bei Zahlungsausfall der GIIPSZ-Länder; bezogen auf das Potenzial (3. Säule).

Quelle: ifo Haftungspegel, www.ifo.de

land ausgezahlt. Im Zusammenhang mit den Verhandlungen über ein zweites Rettungspaket für Griechenland (siehe unten) wurde festgelegt, dass die noch nicht ausgeschöpften Mittel (24,4 Mrd. Euro) nicht mehr als bilaterale Kredite vergeben werden, sondern von der EFSF ausgereicht werden.²⁷ Der zweite Geldgeber, der IWF, hatte bis Ende 2011 Hilfskredite in Höhe von rund 20 Mrd. Euro an Griechenland ausgezahlt.

Die Euroländer haben im Mai 2010 außerdem beschlossen, einen vorläufigen Rettungsschirm zu installieren: Es wurden der Europäische Finanzstabilisierungsmechanismus (EFSM; im Mai 2010 in Kraft getreten²⁸) und die Europäische Finanzstabilisierungsfazilität (EFSF; im Juni 2010 in Kraft getreten²⁹) gegründet, die Ländern in Finanznot Geld bereitstellen. Dieser Rettungsschirm wird durch zusätzliche finanzielle Leistungen des IWF unterstützt. Der EFSM ist ein EU-Gemeinschaftsinstrument und wird über den EU-Haushalt finanziert. Für die EFSF wurde – nach einem ursprünglichen Garantierahmen von 440 Mrd. Euro – der garantierte Betrag im Oktober 2011 auf 780 Mrd. Euro erhöht (sogenannte Ertüchtigung der EFSF), um das vorgesehene effektive Darlehensvolumen von 440 Mrd. Euro tatsächlich zur Verfügung stellen zu können.³⁰ Der Umfang der Rettungssummen, welche durch den IWF parallel zu den europäischen Hilfen im Rahmen von EFSF und EFSM zur Verfügung gestellt werden, beläuft sich auf (mindestens) 250 Mrd. Euro.³¹

27 Vgl. Deutscher Bundestag 2012a.

28 Vgl. Rat der Europäischen Union 2010.

29 Vgl. European Financial Stability Facility (EFSF).

30 Vgl. Bundesministerium der Finanzen 2011a, S. 36–38.

31 Vgl. Bundesministerium der Finanzen 2011b.

Im März 2011 wurde im Europäischen Rat vereinbart, einen ständigen Stabilitätsmechanismus einzurichten, den Europäischen Stabilitätsmechanismus (ESM), der ab Juli 2013 die Aufgaben von EFSF und EFSM übernehmen und eine effektive Darlehenskapazität von 500 Mrd. Euro erhalten sollte.³² Im Zuge der Verschärfung der Krise beschlossen die Finanzminister der Euroländer am 23. Januar 2012, den ESM bereits im Juli 2012 in Kraft zu setzen und bis Mitte 2013 parallel zur EFSF arbeiten zu lassen. Der entsprechende Vertrag wurde am 2. Februar 2012 durch die Botschafter in Brüssel unterzeichnet.³³ Als Tag des Inkrafttretens wurde das Datum festgelegt, an dem die Ratifikationsurkunden von so vielen Ländern hinterlegt wurden, dass mindestens 90% der Zeichnungssumme erreicht werden.³⁴ Weil der Ratifizierungsprozess in einigen Ländern länger dauerte, trat der Vertrag erst am 27. September 2012 in Kraft, und am 8. Oktober 2012 nahm der ESM seine operative Arbeit auf.³⁵ Am 30. März 2012 einigten sich die Finanzminister der Euroländer auf die Gesamtgröße der Euroschutzschirme: Die Höhe der „Firewall“ wurde mit 800 Mrd. Euro angegeben, davon 500 Mrd. Euro Kreditvergabeolumen des ESM, 200 Mrd. Euro verplante Hilfsmittel der EFSF für Griechenland, Irland und Portugal (tatsächliches Volumen der EFSF-Hilfen für diese drei Länder: 188 Mrd. Euro), 49 Mrd. Euro EFSM-Mittel für die Programme in Irland und Portugal und schließlich aus dem ersten Hilfspaket für Griechenland 53 Mrd. Euro an bereits ausgezahlten bilateralen Krediten.³⁶ Die Obergrenze des ESM (500 Mrd. Euro) wurde also bestätigt, allerdings wurde auch festgelegt, dass dieser Höchstbetrag nicht durch die bereits für Programme in Irland, Portugal und Griechenland vereinbarten EFSF-Mittel reduziert wird. Eine Einschränkung für die Inanspruchnahme des ESM ist, dass die Gewährung von Hilfgeldern an die Ratifizierung des Fiskalvertrags bis 1. März 2013 gekoppelt ist.³⁷ Um das Ausleihvolumen von 500 Mrd. Euro sicherzustellen, ist es nötig, den ESM mit 700 Mrd. Euro Stammkapital auszustatten. Diese Summe teilt sich auf in 80 Mrd. Euro einzuzahlendes und 620 Mrd. Euro abrufbares Kapital.³⁸

Diese Finanzhilfemechanismen haben bereits mit vier Euroländern Vereinbarungen über Hilfszahlungen geschlossen (vgl. die zweite Säule in der Abbildung). Im November 2010 beantragte Irland als erstes Land Unterstützung aus dem Schutzschirm. Das vereinbarte Gesamtpaket hat ein Volumen von 85 Mrd. Euro. Irland selbst trägt davon 17,5 Mrd. Euro durch die Auflösung von Barreserven und aus einem Pensionsfonds, und die Nicht-Euroländer Vereinigtes Königreich (3,8 Mrd. Euro), Schweden (0,6 Mrd. Euro) und Dänemark (0,4 Mrd. Euro) gewähren ihrerseits bilaterale Kredite. So verbleiben als Beitrag von EFSM, EFSF und IWF 62,7 Mrd. Euro (grünes Rechteck), wovon je 22,5 Mrd. Euro auf EFSM und IWF entfallen, die restlichen 17,7 Mrd. Euro auf die EFSF.³⁹ Portugal beantragte im April 2011 Finanzhilfen aus dem Rettungsschirm.⁴⁰ Für dieses Land wurde ein Paket im Umfang von 78 Mrd. Euro (gelbes Rechteck) geschnürt, zu dem EFSM, EFSF

32 Vgl. *Europäischer Rat* 2011.

33 Vgl. *Bundesministerium der Finanzen* 2012a.

34 Vgl. *Europäischer Rat* 2012, ESM-Vertrag, Artikel 48.

35 Vgl. *Bundesministerium der Finanzen* 2012e.

36 Vgl. *Bundesministerium der Finanzen* 2012b.

37 Vgl. *Bundesministerium der Finanzen* 2012c.

38 Vgl. *Deutscher Bundestag* 2012b.

39 Vgl. *Europäischer Rat* 2010.

40 Vgl. *Bundesregierung* 2011.

und IWF jeweils 26 Mrd. Euro beisteuern.⁴¹ Schließlich zeigte sich, dass ein zweites Rettungspaket für Griechenland nötig wurde, welches im Juli 2011 vereinbart wurde.⁴² Bereits auf dem EU-Gipfel-Treffen im Oktober 2011 wurde dieses Paket an die aktuelle Entwicklung angepasst,⁴³ und der dort festgelegte Betrag von 130 Mrd. Euro bis 2014 wurde schließlich im Februar 2012 bestätigt.⁴⁴ Am 14. März 2012 beschlossen die Euroländer endgültig das zweite Rettungspaket mit einem Volumen von 144,6 Mrd. Euro (einschließlich der 24,4 Mrd. Euro des ersten Rettungspakets, die noch nicht ausgezahlt wurden) bis Ende 2014 aus EFSF-Mitteln. Schließlich gab der IWF am 15. März 2012 bekannt, Griechenland 28 Mrd. Euro (einschließlich der vom ersten Rettungspaket nicht in Anspruch genommenen rund 10 Mrd. Euro) bis zum ersten Quartal 2016 zur Verfügung zu stellen.⁴⁵ Es wurden also insgesamt mehr als 138 Mrd. Euro an neuen Finanzhilfen zugesagt: von den Euroländern *via* EFSF 120,2 Mrd. Euro, vom IWF etwa 18 Mrd. Euro. Der Unterschied zu den oben genannten 130 Mrd. Euro erklärt sich daraus, dass von den IWF-Hilfen 8,25 Mrd. Euro erst in den Jahren 2015/2016 ausgezahlt werden.⁴⁶ Zusammen mit dem ersten Hilfspaket belaufen sich die Finanzhilfen für Griechenland auf knapp 246 Mrd. Euro (in der Abbildung hellblau), davon steuern die Euroländer 197,5 Mrd. Euro bei, der IWF rund 48 Mrd. Euro. Die Hilfgelder für die drei Länder werden in der Abbildung durch die Rechtecke in den Farben hellblau (für Griechenland), grün (für Irland) und gelb (für Portugal) repräsentiert; in der ersten Säule sind, wie erwähnt, die bereits erfolgten Zahlungen erfasst, in der zweiten (und der dritten) die zugesagten Beträge.

Anfang Juni 2012 informierte die spanische Regierung die Europartner, dass sie zur Restrukturierung des Bankensektors ein Hilfersuchen an die Euroländer stellen wolle. Daraufhin wurde ein Hilfskredit von bis zu 100 Mrd. Euro von EFSF/ESM in Aussicht gestellt.⁴⁷ Am 25. Juni 2012 wurde der Antrag dann gestellt.⁴⁸ Das Programm trat am 23. Juli 2012 in Kraft.⁴⁹ Vorläufige Berechnungen haben einen Kapitalbedarf von 51 Mrd. Euro bis 62 Mrd. Euro ergeben, einschließlich eines Sicherheitspuffers bleibt es bei der Gesamtsumme von 100 Mrd. Euro.⁵⁰ Die Gelder sollen durch den ESM ausgezahlt werden.⁵¹ Dieses Hilfspaket wird in der Abbildung durch das hellgrüne Rechteck in der zweiten und in der dritten Säule dargestellt. Ebenfalls am 25. Juni 2012 gab die Regierung Zyperns bekannt, dass das Land um Hilfgelder nachfragen werde.⁵² Dieses Land leidet sehr unter der engen Verflechtung mit Griechenland, wovon wiederum besonders die Banken betroffen sind. Hier lassen sich noch keine Details zu einem Hilfspaket nennen.

Die dritte Säule in der Abbildung zeigt das potenzielle Kreditvolumen aller Rettungsmaßnahmen, wenn die Mittel des ESM hinzugerechnet werden, der im Jahr 2012 beschlossen wurde. Für die EZB-Hilfen wird der gleiche Betrag wie in der links daneben stehen-

41 Vgl. *Rat der Europäischen Union* 2011a.

42 Vgl. *Rat der Europäischen Union* 2011b.

43 Vgl. *Rat der Europäischen Union* 2011c.

44 Vgl. *Rat der Europäischen Union* 2012a.

45 Vgl. *Europäische Kommission* 2012a, S. 4.

46 Vgl. *Europäische Kommission* 2012a, S. 94; und *International Monetary Fund* 2012a, S. 84.

47 Vgl. *Rat der Europäischen Union* 2012b.

48 Vgl. *Europäische Kommission* 2012b.

49 Vgl. *Europäische Kommission* 2012c, S. 30.

50 Vgl. *European Stability Mechanism* 2012, S. 20.

51 Vgl. *European Stability Mechanism* 2012, S. 25.

52 Vgl. *Republik Zypern* 2012.

den Säule angesetzt. Die vereinbarten Rettungspakete für Griechenland, Irland, Portugal und Spanien entsprechen ebenfalls der Darstellung in dieser Säule. Das violette Rechteck beziffert die IWF-Mittel, die von den zur Verfügung gestellten 250 Mrd. Euro noch übrig sind. Das sind nach Abzug der bereits zugesagten Mittel in Höhe von 67 Mrd. Euro (22,5 Mrd. Euro für Irland, 26 Mrd. Euro für Portugal und 18 Mrd. Euro für Griechenland) derzeit 183 Mrd. Euro. Das graue Rechteck, das die Säule nach oben abschließt, steht für den permanenten Rettungsschirm ESM, von dessen Kreditvergabekapazität nach Abzug der Hilfe für Spaniens Bankensektor noch 400 Mrd. Euro verfügbar sind.

3.2 Die Einzelpositionen der deutschen Haftungssumme

In der rechten Säule der Abbildung stehen, abgeleitet aus den in der dritten Säule dargestellten potenziellen Hilfgeldern, die Haftungsbeträge Deutschlands. Der Schlüssel nach dem sich der deutsche Anteil errechnet, ist für die einzelnen Positionen unterschiedlich. Bei den Target-Verbindlichkeiten der Krisenländer berechnet sich der deutsche Haftungsanteil aus dem Kapitalschlüssel der EZB vom 1. Januar 2011. Danach hat Deutschland einen Anteil von ca. 27% an allen 17 Euroländern.⁵³ Wenn es aber – wie hier angenommen – zu einem Zahlungsausfall der Krisenländer und zu deren Austritt aus der Währungszone kommt, während der Euro bestehen bleibt, können nur noch die verbleibenden elf Euroländer für die ausfallenden Target-Verbindlichkeiten aufkommen. Auf Deutschland entfallen in diesem Szenario ca. 43% der Haftungssumme. Die aktuelle Haftung ist in der Abbildung (rotes Rechteck der rechten Säule) dargestellt.

Das dunkelblaue Teilstück der rechten Säule zeigt, wie oben beschrieben, die Staatsanleihenkäufe durch die Notenbanken. Da sich die Zentralbanken aller Euroländer, auch jene der Krisenländer selbst, an diesen Käufen beteiligen, berechnet sich die deutsche Haftung nach dem allgemeinen EZB-Kapitalschlüssel. Dementsprechend ist Deutschland mit ca. 27% beteiligt.

Als nächstes werden mit dem hellblauen Rechteck die beiden Rettungspakete für Griechenland angesprochen. Zum ersten steuerte Deutschland bilaterale Kredite von insgesamt 15,2 Mrd. Euro bei. Von den EFSF-Geldern des zweiten Programms muss Deutschland knapp 43% tragen, sollten Griechenland, Irland, Portugal, Spanien, Italien und Zypern ausfallen. Dies ist wieder Deutschlands Anteil am Kapitalschlüssel der Euroländer ohne Krisenländer. An den parallel durchgeführten beiden IWF-Rettungspaketen ist Deutschland mit einem Anteil beteiligt, der sich nach seinem Beitrag zur Kapitalausstattung des IWF richtet, also mit 6%.⁵⁴

Bei den Hilfgeldern für Irland (grün) und Portugal (gelb) gilt für die Beiträge von EFSF und IWF der gleiche Anteil wie bei Griechenland. Zu den über den EFSM bereitgestellten Mitteln steuert Deutschland knapp 20% bei, denn dies ist der aktuelle deutsche Anteil an den Einnahmen des EU-Haushalts.⁵⁵ Weil beim ESM keine spezifische Haftung der Mitgliedsländer für konkrete Finanzhilfen vorgesehen ist,⁵⁶ wird der deutsche Anteil am Programm zur Rekapitalisierung der spanischen Banken nicht einzeln aufgelistet, er ist im allgemeinen deutschen Haftungsbeitrag zum ESM enthalten (siehe unten).

53 Errechnet aus: EZB, Kapitalzeichnung, <http://www.ecb.int/ecb/orga/capital/html/index.de.html>.

54 Vgl. *International Monetary Fund* 2012b.

55 Vgl. *Europäische Kommission* 2011, S. 99.

56 Vgl. *Bundesministerium der Finanzen* 2012d.

Der Beitrag Deutschlands zu den noch nicht verplanten Geldern des IWF (violett) beläuft sich abermals auf 6%. Der permanente Rettungsschirm ESM wird insgesamt mit einem Stammkapital von 700 Mrd. Euro ausgestattet sein. Die deutsche Haftung (graue Fläche) errechnet sich aus einem Anteil von etwas mehr als 27%.⁵⁷ In der Abbildung werden das einzuzahlende Kapital (21,7 Mrd. Euro) und das abrufbare Kapital (168,3 Mrd. Euro) separat dargestellt.

Der dünne, rosafarbene Strich unterhalb der Nulllinie steht für die Verbindlichkeiten Deutschlands gegenüber den Krisenländern, die sich aus deren (insgesamt gesehen) unterproportionaler Banknotenausgabe ergeben. Deutschland ist hier (Berechnungsbasis wie bei den Target-Salden) ein Anteil von rund 43% zuzuschreiben.

Irritierend ist es zu sehen, dass sich die EZB bei der Staatenrettung in viel stärkerem Maße als die Staatengemeinschaft engagiert hat. Man erkennt das an den geschweiften Klammern auf der rechten Seite der ersten Säule. Offenbar hat die Staatengemeinschaft mit Billigung der nationalen Parlamente 262 Mrd. Euro oder 19% zur Verfügung gestellt, während die EZB mit Billigung und aktiver Unterstützung des EZB-Rates 1082 Mrd. Euro oder 81% gab. Mehr als 80% der bislang gewährten Hilfen kamen also von der EZB, ohne dass die nationalen Parlamente eingeschaltet wurden, und nur ein Fünftel basiert auf einer Parlamentsbeteiligung. Und von den EZB-Mitteln wiederum sind 83% Target-Kredit. Insgesamt macht der Target-Kredit mehr als zwei Drittel (67%) aller bislang gewährten Hilfen aus. Er stellt die bei Weitem wichtigste und größte Kredithilfe für die bedrängten Euroländer dar.

4. Beispiel USA

Die Möglichkeit, Target-Kredite aufzunehmen, ist ein Konstruktionsfehler des Euro als Gemeinschaftswährung, den die europäische Schuldenkrise schonungslos offengelegt hat. Sie lädt zur Selbstbedienung der kreditschwachen Mitglieder des Euroverbunds auf Kosten der stärkeren Euroländer ein, führt zu extrem hohen Außenschulden, verzerrt die Kapitalallokation und untergräbt die Fähigkeit der EZB, die Volkswirtschaften der Länder, denen das zusätzlich geschaffene Geld zufließt, mit ihrem Hauptrefinanzierungssatz (Ausleihzins) zu steuern.

Im US-amerikanischen System gibt es mit den *Interdistrict Settlement Accounts* (ISA) ein verwandtes System, über das die Zahlungen zwischen den zwölf Distrikten des *Federal-Reserve-Bank-Systems* (Fed) verbucht werden. Das Geldsystem der USA ist nicht auf dem Reißbrett entstanden, sondern hat sich evolutiv entwickelt.

Von Anfang an gab es den Dollar als Münze. Da der Gold- und Silbergehalt gesetzlich genau festgelegt war, durften die staatlichen Münzämter der Bundesstaaten die erforderlichen Münzen prägen. Dollar-Banknoten wurden erstmals zur Finanzierung des Sezessionskrieges im Jahr 1861 ausgegeben. Und erst 1913 wurde die heute bestehende amerikanische Zentralbank, die *Federal Reserve Bank* („Fed“), gegründet. Zuvor waren schon in den Jahren 1791 und 1816 Zentralbanken gegründet worden, doch waren sie jeweils nur für 20 Jahre lizenziert und wurden dann wieder geschlossen. Zeitgleich mit der Gründung der Fed wurden zwölf Distrikt-Zentralbanken oder „District Feds“

⁵⁷ Vgl. *Europäischer Rat* 2012, ESM-Vertrag, Anhang I.

geschaffen, die die Geldschöpfung nach den Regeln der Fed tatsächlich durchführten und Banknoten druckten und verliehen. Die Struktur des amerikanischen Geldsystems ist insofern mit dem Eurosystem durchaus vergleichbar. Auch von der Größe her ähneln die *District Feds* den 17 nationalen Notenbanken im Eurosystem.

Das amerikanische Zentralbankensystem ist allerdings kein staatliches System. So gehören die *District Feds* den privaten Geschäftsbanken und werden für sie tätig. Die Distriktgrenzen haben auch wenig mit den Staatsgrenzen zu tun. Teilweise gehören mehrere Bundesstaaten zu einer *District Fed*, und umgekehrt kann es sein, dass das Territorium eines Bundesstaates zwei Fed-Distrikte überlagert.⁵⁸

Diese Historie mag erklären, warum das Thema der Target-Salden in den USA nie die Bedeutung hatte, die es heute in der Eurozone gewonnen hat. Zum einen erklärt sie, warum sich das Notenbankensystem nicht in den Dienst der Finanzierung einzelner Bundesstaaten stellen lassen, anders als im Eurosystem, wo die nationalen Notenbanken Geld drucken und an die Geschäftsbanken des Landes verleihen, damit diese mit ihm Staatspapiere kaufen können. Zum anderen konnten die Salden nie die gleiche Bedeutung wie in Europa erlangen, weil die *District Feds* sich bemüht haben, sie zu vermeiden.

Bevor es das *Federal-Reserve*-System gab, wurden natürlich auch schon Dollar-Überweisungen von einer zur anderen Bank quer über den Kontinent vorgenommen, ohne dass dabei Geld physisch transportiert wurde. Man verschickte Schecks, und zur Einlösung der Schecks mussten die Überweisungen zwischen den Banken durchgeführt werden. Auch damals haben die Banken diese Überweisungsaufträge saldiert und sich temporär auch kreditiert, doch die Salden mussten in der Zahlungsbilanz in regelmäßigen Abständen physisch ausgeglichen werden, zumeist mit Gold, das dann zwischen den Banken transportiert wurde. Mit dem Thema ist jeder Liebhaber von Wild-West-Filmen bestens vertraut.

Mit dem neuen System der *Federal-Reserve*-Bank wurde der Zahlungsverkehr insofern vereinfacht, als nun bei der Fed ein Clearing-Portfolio an goldbesicherten verzinslichen Wertpapieren geschaffen wurde, das den einzelnen *District Feds* anteilig gehörte und dessen Eigentumsanteile für die Begleichung der Verrechnungssalden zwischen den *District Feds* verschoben wurden. Das machte den physischen Goldtransport überflüssig.

Nach dem Ende des Bretton-Woods-Systems hat man im Jahr 1975 von den goldbesicherten Wertpapieren Abstand genommen und die Wertpapiere des Offenmarktportfolios, das die *District Feds* im Zuge der Geldpolitik erwarben, für den Saldenausgleich herangezogen, wobei die Zinsen auf dieses Portfolio entsprechend neu zwischen den *District Feds* verteilt wurden. Das ändert aber nichts an der Natur des Vorgangs.

Das Instrument zur Verringerung von Defiziten im Zahlungsverkehr ist die Einschränkung der lokalen Kreditvergabe. Kommt es zu Geldabflüssen durch Nettoüberweisungen an andere Zentralbanken, zum Beispiel weil die Wirtschaft des Distrikts überhitzt und einen Importüberhang entwickelt, den die Kapitalmärkte nicht mehr finanzieren wollen, verzichtet die betroffene *District Fed* darauf, den Abfluss in vollem Umfang durch neue Kredite zu kompensieren. Die Folge ist, dass das Geld knapp wird und die lokalen Zinsen steigen. In der Geschichte gab es zwischen den Distrikten immer wieder Zinsunterschiede, genug um privaten Kredit von außen in den Distrikt zu leiten und die Salden wieder zu ver-

58 Zum Beispiel gehören zur *Federal Reserve Bank of San Francisco* die Territorien von sieben Bundesstaaten, während das Territorium von Wisconsin, Illinois oder Indiana zu jeweils zwei *District Feds* gehört.

ringern. Größere Zahlungsbilanzungleichgewichte zwischen den Distrikten konnten in der Vorkrisen-Geschichte der *US-Fed* auf diese Weise vermieden werden.

Die Überweisungsaufträge zwischen den Geschäftsbanken laufen im US-System grundsätzlich über die *District Feds*, von denen jede ein Verrechnungskonto mit jeder anderen der übrigen elf *District Feds* unterhält, das sogenannte *Interdistrict Settlement Account* (ISA). Der Saldo auf diesem Konto ist im Prinzip dasselbe wie der Target-Saldo einer nationalen Notenbank, denn er zeigt an, wie viele Überweisungen die eine *District Fed* netto im Auftrag der anderen ausgeführt hat, wie viel Kredit sie ihr also gegeben hat, indem sie dem Empfänger der Überweisungsaufträge zu eigenen Lasten eine Gutschrift erteilte. Der Unterschied ist nur, dass die ISA-Salden zu bilateralen Schuldverhältnissen führen, während die Target-Salden Schuldverhältnisse mit dem EZB-System als Ganzem begründen, weil die bilateralen Target-Salden jeweils am Ende eines Tages in Forderungen und Verbindlichkeiten gegenüber dem gesamten Eurosystem verwandelt werden.

Hat eine *District Fed* eine negative Summe von ISA-Salden mit anderen *District Feds*, dann hat sie ein Zahlungsbilanzdefizit, weil sie netto Geld, das von ihr vorher durch Refinanzierungskredite oder Wertpapierkäufe geschaffen und an die Privatwirtschaft übertragen wurde, anderswohin überwiesen hat. Das ist exakt dieselbe Größe, wie sie im Euroraum durch einen negativen Target-Saldo gemessen wird, und völlig analog verhält es sich natürlich umgekehrt mit den positiven Salden.

Auch in den USA ist es möglich, dass eine *District Fed* mehr Geld durch lokale Kreditvergabe schafft, als für die Geldzirkulation in ihrem Distrikt benötigt wird, dass es also einen Überlauf von Zentralbankgeld in andere Distrikte gibt, der andere Zentralbanken zwingt, Geld im Zuge von Überweisungsaufträgen auszureichen, ohne dafür Kreditforderungen gegenüber den Geschäftsbanken zu erwerben. Das führt bei der geldschöpfenden *District Fed* zu einem negativen ISA-Saldo, also einer Schuld gegenüber den anderen Zentralbanken.

Anders als in Europa bleibt die Schuld in den USA aber nicht stehen und baut sich von Jahr zu Jahr weiter auf, sondern wird im April eines jeden Jahres getilgt, indem die Eigentumsrechte an dem Clearing-Portfolio zwischen den *District Feds* den ISA-Salden entsprechend neu verteilt werden. Das ist der entscheidende Unterschied. Nur in Europa können sich die Einwohner einer Region das Geld zu Bedingungen, die den Markt unterlaufen, fast nach Belieben aus der Notenpresse ziehen und dann zu einem Zins von derzeit 0,75 % anschreiben lassen, um anderswo einzukaufen. In den USA kann man nicht anschreiben lassen. Dort muss man stattdessen echte, marktfähige Wertpapiere abtreten, die marktgerecht verzinst sind.

Der Anreiz, Salden im Zahlungsverkehr aufzubauen, indem vor Ort mehr Geld geschaffen wird, als dort an zirkulierender Liquidität benötigt wird, ist im US-System begrenzt. Zum einen muss die *District Fed* die Geldschöpfung in der Regel durch den Ankauf des Marktportfolios realisieren, kann also insofern für den lokalen Kreditmarkt keine Zinsverbilligung bewirken. Der in der Eurozone überragende Anreiz, zugunsten der lokalen Wirtschaft zinsverbilligte Kredite aus der Notenpresse zu ziehen, entfällt damit weitgehend. Zum anderen muss die *District Fed* für lokale Refinanzierungskredite (*Primary Credit, Secondary Credit, Seasonal Credit, Term Auction Facility*), die lokale Zinsvorteile schaffen und zu Nettogeldabflüssen in andere Distrikte führen, Eigentumsanteile an ihrem Marktportfolio abgeben und verliert entsprechend auch Zinserträge an diesem Portfolio. Da der Zins für das Offenmarktportfolio über dem Zins für kurzfristige Refinanzierungsoperationen liegt, erleidet sie aus solchen Operationen sogar Gewinn-

einbußen. Sicher, der Gewinn muss an die Bundesregierung abgetreten werden. Insofern könnte man vermuten, dass der Zinsunterschied die lokale *District Fed* nicht kümmert. Indes wird der Gewinn nach Abzug der lokalen Kosten definiert, und zu den Kosten gehören die Gehälter und viele andere Dinge, die die Arbeit in einer *District Fed* angenehm machen. Das dürfte schon ein Anreiz sein, Zinsnachteile zu vermeiden. Auf jeden Fall hat die einzelne *District Fed* schon deshalb keinen Anreiz, in Normalzeiten übermäßig Geld zu schaffen, weil sie dann durch den Verbrauch ihres Eigentumsanteils am Clearing-Portfolio Manövriermasse zur Kompensation zukünftiger Zahlungsbilanzkrisen verliert.

Die Anreize bestehen, obwohl das ISA-Konto nicht vollkommen getilgt wird. Nach einer komplizierten Formel und auch unter dem Einfluss von Einzelentscheidungen des *Federal Reserve Board* wird im Wesentlichen die Differenz zwischen dem aktuellen Jahresdurchschnittswert des Saldos und dem Restbestand des Saldos im jeweils letzten April ausgeglichen. Das ist nicht unerheblich, denn es bedeutet, dass sich auch in den USA während einer Krise Salden aufbauen können. Aber die Salden steigen nicht dauerhaft und systematisch, sondern werden stets wieder abgebaut.

Was wirklich passiert ist, zeigt die blaue Kurve aus Abbildung 5, die die Brutto-Summe der ISA-Salden, also die Summe aller Forderungen der *District Feds* (oder, was dasselbe ist, die Summe aller Schulden) relativ zum US-Bruttoinlandsprodukt (BIP) darstellt. Man erkennt, dass die Summe der ISA-Salden vor der Finanzkrise nur bei etwa 0,2% bis 0,3% des BIP lag, dann in der Krise auf 2% bis fast 3% hochschoss und im Jahr 2012 wieder auf ein niedriges Niveau in der Nähe des Vorkrisenniveaus zurückging.

Man erkennt auch deutlich, dass die Zahlenwerte jeweils zum April zurückgingen. Vor dem April des Jahres 2009 sanken sie allmählich, Monat für Monat, weil sich die *District Feds* offenbar bemüht hatten, den Verlust von Vermögensanteilen am Clearing-Portfolio der Fed zu vermeiden, indem sie weniger Kredit vergaben. Der Rückgang des Kredits erzeugte einen Rückfluss von Geld aus anderen Distrikten, weil sich die Wirtschaftssubjekte den gewünschten Kredit auf dem amerikanischen Markt leihen mussten. Die Tilgung selbst war hierfür nicht die Erklärung, denn im April selbst passierte wenig, wie man sieht. Nach dem Tilgungstermin gingen die Salden wieder hoch. Dass die Salden vor dem April fielen und danach wieder anstiegen, belegt den Anreizeffekt, von dem oben die Rede war, in aller Deutlichkeit.

Im April des Jahres 2010 gingen die ISA-Salden sehr rasch zurück, offenbar weil in diesem Monat tatsächlich getilgt wurde, indem die Notenbanken der Defizit-Distrikte Eigentumsrechte am Clearing-Portfolio der Fed an die Notenbanken der Überschuss-Distrikte abtraten.

Einzig im April des Jahres 2011 ist demgegenüber nichts Wesentliches passiert. Das liegt, wie man hört, daran, dass das *Federal Reserve Board* beschloss, die Tilgung ein Jahr auszusetzen. Umso größer war freilich der Rückgang der Refinanzierungskredite der defizitären *District Feds* vor dem April 2012 und die tatsächliche Tilgung in diesem Monat. Am aktuellen Rand, in der Mitte zwischen zwei Tilgungszeitpunkten, lag deshalb die Brutto-Summe der ISA-Salden in den USA nur noch bei 0,7% des BIP oder 112 Mrd. Dollar.

Wie anders ist doch die Situation in Europa! In der Eurozone, dargestellt durch die rote Kurve, lag die Brutto-Summe der Target-Salden bis zur Finanzkrise bei 1% des BIP, stieg dann mit dem Beginn der Krise im Jahr 2007 fortlaufend an, erreichte im Jahr 2010 ein

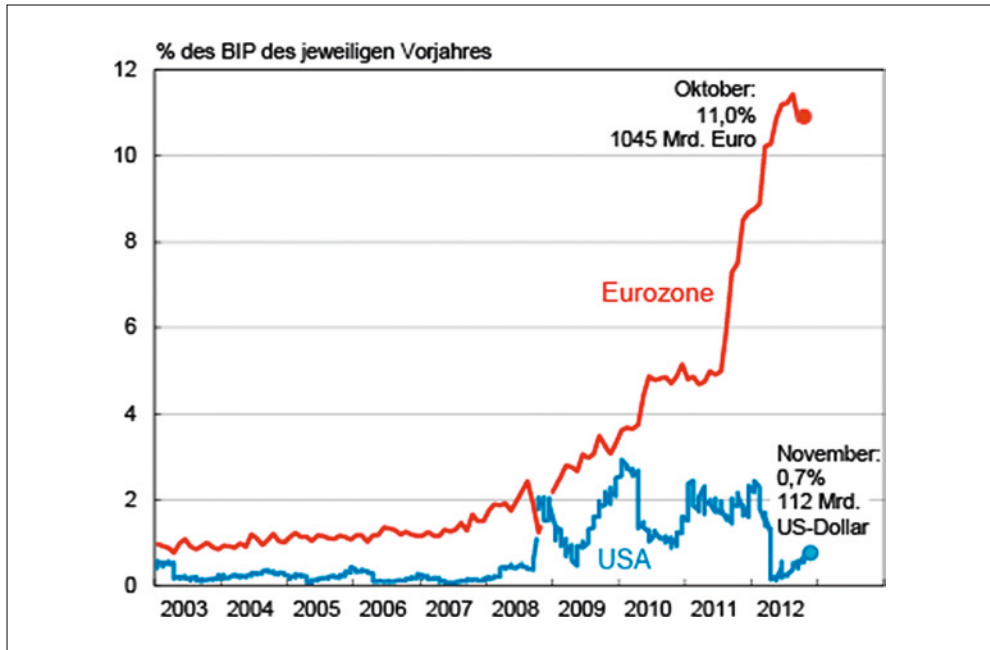


Abb. 5 Target- und ISA-Salden* als Anteil des BIP der Eurozone beziehungsweise der USA (Januar 2003 – November 2012). *Summe der Brutto-Target-Forderungen beziehungsweise Summe der Brutto-ISA-Forderungen der Notenbanken des Euro- beziehungsweise Fed-Systems. Hinweis: Die Daten entsprechen dem Kenntnisstand vom November 2012. Da die Länder ihre Target-Salden zu unterschiedlichen Zeitpunkten veröffentlichen, ist die Datenlage am aktuellen Rand noch etwas uneinheitlich. Die Daten für den Brutto-Saldo der Eurozone umfassen die Überschussländer, also Deutschland (Oktober 2012), Frankreich (September), die Niederlande (September), Finnland (September), Estland (September) und Luxemburg (September). Quelle: SINN und WOLLMERSHÄUSER 2011a (Abb. 1, Fortschreibung).

Zwischenplateau von etwa 5% und schoss in der Spitze hoch auf 11,4% des Eurozonen-BIP oder 1075 Mrd. Euro. Der Löwenanteil dieser Target-Forderungen entfiel, wie schon gezeigt wurde, mit 751 Mrd. Euro auf Deutschland. Auf der anderen Seite der Bilanz steht Spanien mit 434 Mrd. Euro Target-Schulden vorn, gefolgt von Italien mit 287 Mrd. Euro. Mittlerweile hat sich die Situation etwas entspannt, weil die EZB im September 2012 den unbegrenzten Kauf von Staatspapieren angekündigt hat, doch sind die Werte immer noch extrem hoch.

Hinter dem raketenhaften Anstieg der Target-Kurve steckt die riesige Umschichtung der Ersparnisse der Deutschen von fungiblen marktfähigen Anlagen, die man im Alter bei Bedarf verbrauchen möchte, zu bloßen Verrechnungssalden, die Deutschland niemals fällig stellen kann und die durch die Inflation allmählich verdampfen.

Der Vergleich mit den USA zeigt den Konstruktionsfehler des Eurosystems in aller Deutlichkeit auf. Wenn man ein System schafft, in dem für die schwachen Länder unbegrenzte Geldbeträge im Schaufenster des Währungssystems liegen, dann wird zwar ein Maximum an Vertrauen erzeugt, das die Kapitalmärkte stabilisiert und Zinsunterschiede zwischen den Regionen minimiert. Aber genau deswegen werden die Volkswirtschaften

destabilisiert, indem sie zur übermäßigen Kreditaufnahme angeregt werden. Das führt zur inflationären Überhitzung, zu riesigen Außenhandelsungleichgewichten und zum Verlust der Wettbewerbsfähigkeit, bis die Außenschulden dann so groß werden, dass Kapitalmärkte eine Sprengung der Systemgrenzen erwarten, sich zurückziehen und die vom Kredit abhängigen Volkswirtschaften das Geld aus dem Schaufenster nehmen. Das Geld, das genommen wurde, wird durch die rote Kurve verdeutlicht.

Es ist eben nicht richtig, den Kapitalmärkten durch künstliche Schutzvorrichtungen wie eine unbegrenzte Geldmenge im Schaufenster oder eine unbegrenzte Feuerkraft der Notenbank ein Maximum an Vertrauen zu geben. Vielmehr lebt das kapitalistische System vom gesunden Misstrauen der Anleger, von der dauernden Vorsicht derer, die Angst haben, ihr Geld zu verlieren. Die Möglichkeit, das eingesetzte Geld zu verlieren, darf man den Märkten nie nehmen, sonst geraten sie außer Rand und Band, und man verliert die Kontrolle – wie der Fahrer eines Autos, das ohne Bremsen den Berg hinunterrollt.

Man hat mir entgegengehalten, Maßnahmen zur Begrenzung der Target-Salden könne man nicht ergreifen, weil dann das Eurosystem kollabieren würde. Die Salden seien geradezu nötig für einen reibungslosen Zahlungsverkehr, und deswegen müsse alles so bleiben, wie es ist. Wenn diese Auffassung richtig wäre, dürften die USA gar nicht existieren und hätten schon lange kollabieren müssen.

In Wahrheit existiert das Geldsystem der USA nun schon sehr lange, weil es die Möglichkeit der Selbstbedienung durch Target-Salden und auch gemeinschaftliche Anleihen der Bundesstaaten nicht kennt: eben weil es harte Budgetbeschränkungen hat! Auch in den USA ist es möglich, dass Regionen mehr Güter verbrauchen, als sie liefern, also ein Leistungsbilanzdefizit haben, aber sie müssen sich dafür im Wesentlichen zu Marktbedingungen verschulden, also Zinsen und Sicherheiten bieten, die Sparer anderer Regionen veranlassen, ihnen Kredit zu geben. Je mehr die Verschuldung auf diese Weise steigt, desto höher werden die Zinsen, und desto unattraktiver wird die Kreditaufnahme. Genau dieser Mechanismus verhindert die übermäßige private und öffentliche Verschuldung, die inflationäre Überhitzung und die riesigen Außenhandelsdefizite, unter denen die Länder Südeuropas heute leiden und derentwegen Politiker wie Christine LAGARDE Deutschland angreifen.

Das US-System ist nicht so strikt, dass es den immerwährenden Zahlungsbilanzausgleich erzwingt. Wie die Abbildung zeigt, sind zeitweilig Zahlungsbilanzdefizite durchaus möglich. Wenn der Kredit nicht reicht, das Leistungsbilanzdefizit zu decken, darf die entsprechende *District Fed* Geld nachdrucken und verleihen. Nur muss der so induzierte Abfluss von Geld immer nach kurzer Zeit wieder ausgeglichen werden. Das System enthält also Stoßdämpfer, die straff genug eingestellt sind, das Durchschlagen der Räder zu verhindern und den Wirtschaftswagen auf Kurs zu halten.

Die Zahlungsbilanzsalden wurden in den USA anfangs mit Gold ausgeglichen, ähnlich wie es weltweit immer zwischen Währungsgebieten der Fall war, und erst ein gutes Jahrhundert nach der Gründung der USA führte man mit der Schaffung der Fed ein zentrales Verrechnungssystem auf der Basis von goldgedeckten Wertpapieren ein, die später zu marktfähigen sicheren Wertpapieren mutierten. Bis zum heutigen Tage müssen die Zahlungsbilanzdefizite durch die Übergabe echter Vermögensobjekte ausgeglichen werden. Die Vorstellung, man könne auf den Ausgleich verzichten und sich mit dem bloßen Anschreiben auf dem Bierdeckel begnügen wie in Europa, ist im Lichte der Entwicklungsgeschichte des US-amerikanischen Systems nicht überzeugend.

5. Zum Verlauf der Krise

Die unbegrenzte Verfügbarkeit der Target-Kredite ist der zentrale Konstruktionsfehler des Eurosystems und das Charakteristikum, das dieses System vom amerikanischen Währungssystem grundlegend unterscheidet. Wenn man diesen Konstruktionsfehler nicht beseitigt, wird das Eurosystem am Ende auseinanderbrechen.

Vor dem Crash wird man nach der Logik der Target-Falle die Zentralbanken der Mitgliedsländer zwingen, noch mehr Staatspapiere zu kaufen, den ESM noch mehr in Richtung Eurobonds verändern und die Vergemeinschaftung der Bankschulden weiter vorantreiben, um die Explosion der Target-Kredite zu stoppen oder wenigstens zu verlangsamen. Besser wäre es sicherlich, die Target-Salden durch eine Beschränkung des billigen Kredits aus der Notenpresse zu verringern. Dazu gibt es viele Möglichkeiten.

Die technisch einfachste Möglichkeit besteht darin, dass der EZB-Rat seine Politik der niedrigen Sicherheitsstandards für die Pfänder, die für Refinanzierungskredite zu hinterlegen sind, beendet. Wenn es Refinanzierungskredit nur noch gegen sichere Pfänder gibt, haben die Banken keinen Vorteil mehr, wenn sie den Kredit von der EZB beziehen, denn mit sicheren Pfändern erhalten sie jederzeit auch am Interbankenmarkt billigen Kredit.

Aber die Rückkehr zu besseren Sicherheitsstandards fordert die Bundesbank schon lange und kommt damit gegen die Mehrheit im EZB-Rat nicht an. Eine Lösung innerhalb des bestehenden Systems ist offenkundig nicht möglich, solange die Länder, die von den Target-Salden profitieren, die Mehrheit im EZB-Rat haben. Das Thema bedarf eines grundlegenden Ansatzes.

Letztlich wohl nicht vermeidbar ist es, wenn die Bundesregierung in die Offensive geht und eine Neuverhandlung der EU-Verträge verlangt. Damit wird sie zwar auf massive Widerstände stoßen, doch wenn sie Deutschlands ökonomische und politische Macht in die Waagschale wirft, wird sie etwas erreichen können. Immerhin geht es bei der Sache ja um Forderungen, deren Höhe schon heute an das Nettoauslandsvermögen der Bundesrepublik Deutschland heranreicht. Die Bundesregierung sollte dann verlangen, dass die amerikanischen Regeln für den Ausgleich der Target-Salden auch in der Eurozone umgesetzt werden. Man wird vieles an möglichen Gegenargumenten vorbringen. Indes kommt man an der amerikanischen Wirklichkeit nicht vorbei. Keiner kann den Vorschlag, das amerikanische System zu realisieren, für undurchführbar erklären.

Wie man das US-System mit seinem Clearing-Portfolio im Einzelnen auf das Eurosystem übertragen würde, ist debattierbar. Eine einfache Möglichkeit bestünde darin, dass alle Euroländer nach einheitlichen Regeln staatliche Pfandbriefe schaffen, die mit Gold oder Immobilien besichert sind und die eine für solche Papiere marktübliche Verzinsung aufweisen. Das hat die *European Economic Advisory Group* (EEAG) in ihrem jüngsten Jahresbericht vorgeschlagen.⁵⁹ Mit diesen Pfandbriefen müssten die Länder zunächst die schon vorhandenen Target-Schulden ihrer nationalen Notenbanken tilgen.

Sodann könnte ein jedes Land weitere Pfandbriefe auf dem Wege über seine Notenbank in Proportion zu deren Kapitalanteil in ein Clearing-Portfolio der EZB einbringen, an dessen Gesamtwert es wiederum ein Eigentum in Höhe dieses Anteils hat. Die Pfandbriefe müssen marktfähig sein und tatsächlich gehandelt werden, was voraussetzt, dass sich die Länder auch im Rahmen ihrer normalen Verschuldung zum Teil dieser Papiere bedienen.

⁵⁹ Vgl. *European Economic Advisory Group at CESifo* 2012, Kapitel 2, insbesondere S. 75–79.

New York hat 1975 Pfandbriefe ausgegeben, die mit vorrangigen Ansprüchen auf das zukünftige Steueraufkommen besichert waren, und konnte seinen Konkurs auf diese Weise in letzter Sekunde abwenden. Finnland hat 1995 mit Immobilien besicherte Pfandbriefe ausgegeben, um sich günstig zu refinanzieren, nachdem es in den Strudel der Transformationskrise der Sowjetunion geraten war. Italiens Notenbank verfügt über riesige Goldvorräte, der griechische Staat über ein gewaltiges Immobilienvermögen und riesige Gaslagerstätten in der Ägäis. Wäre nur der Wille vorhanden, gäbe es Wege genug.

Literatur

- BLANKART, C. B.: Der Euro 2084. ifo Schnelldienst 64/16 (31. August 2011), 20–24 (2011)
Bundesministerium der Finanzen: Monatsbericht Oktober 2011. (2011a)
Bundesministerium der Finanzen: Ein Schutzschirm für Europa. 18. August (2011b)
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/Stabilisierung_des_Euro/Finanzhilfemechanismen/2010-05-12-schutzschirm-fuer-europa.html?view=renderPrint
Bundesministerium der Finanzen: Unterzeichnung des ESM-Vertrags. 3. Februar (2012a)
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/Stabilisierung_des_Euro/Finanzhilfemechanismen/2012-01-27-esm.html
Bundesministerium der Finanzen: Die Firewall steht: 800 Milliarden Euro für den Krisenfall. 30. März (2012b)
<http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/2012-03-30-Firewall.html>
Bundesministerium der Finanzen: Europäischer Stabilitätsmechanismus (ESM). 21. Mai (2012c)
http://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Europa/Stabilisierung_des_Euroraums/Stabilitaetsmechanismen/EU_Stabilitaetsmechanismus_ESM/eu_stabilitaetsmechanismus_esm.html
Bundesministerium der Finanzen: Fragen und Antworten zur Finanzhilfe für Spanien. 7. August (2012d)
<http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/FAQ/2012-07-19-spanien-faq.html#doc278196bodyText19>
Bundesministerium der Finanzen: Der ESM nimmt seine Arbeit auf. 8. Oktober (2012e)
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/Stabilisierung_des_Euro/Finanzhilfemechanismen/2012-10-08-der-esm-nimmt-seine-arbeit-auf.html
Bundesregierung: Portugal beantragt Hilfe aus Euro-Rettungsschirm. 8. April (2011)
<http://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2011/04/2011-04-08-portugal-hilfen.html>
Deutsche Bundesbank: Statistiken, Zeitreihen-Datenbanken, Makroökonomische Zeitreihen.
Zeitreihe BBK01.EU8201: Auslandsposition der Bundesbank-Bestand-/ Gold (1998a)
http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_details_value_node.html?listId=www_s201_b1005&tsId=BBK01.EU8201
Deutsche Bundesbank: Statistiken, Zeitreihen-Datenbanken, Makroökonomische Zeitreihen.
Zeitreihe BBK01.WJ5501: Goldpreis in Frankfurt am Main / Fixing der Frankfurter Wertpapierbörse / 1 kg Feingold = . . . DM / bis 1998 (1998b)
http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_details_value_node.html?tsId=BBK01.WJ5501&listId=www_s331_b01015_1
Deutsche Bundesbank: Geschäftsbericht 1998, 1. April (1999)
Deutsche Bundesbank: Geschäftsbericht 1999, 6. April (2000)
Deutsche Bundesbank: Geschäftsbericht 2011, 13. März (2012a)
Deutsche Bundesbank: Statistiken, Zeitreihen-Datenbanken, Makroökonomische Zeitreihen.
Zeitreihe BBK01.TUB600: Gold und Goldforderungen Bundesbank, Juli (2012b)
http://www.bundesbank.de/Navigation/DE/Statistiken/Zeitreihen_Datenbanken/Makrooekonomische_Zeitreihen/its_details_value_node.html?tsId=BBK01.TUB600
Deutscher Bundestag: Antrag des Bundesministeriums der Finanzen, Finanzhilfen zugunsten der Hellenischen Republik; Einholung eines zustimmenden Beschlusses des Deutschen Bundestages nach § 3 Absatz 1 des Stabilisierungsmechanismusgesetzes (StabMechG) für Notmaßnahmen der Europäischen Finanzstabilisierungsfazilität zugunsten der Hellenischen Republik. Drucksache 17/8730, 24. Februar (2012a)
<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/087/1708730.pdf>

- Deutscher Bundestag*: Entwurf eines Gesetzes zur finanziellen Beteiligung am Europäischen Stabilitätsmechanismus. Drucksache 17/9048, 20. März (2012b)
<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/090/1709048.pdf>
- European Economic Advisory Group at CESifo*: The European Balance-of-Payments Problem. Report on the European Economy, München (2012)
- Europäische Kommission*: EU Budget 2011 – Financial Report. (2011)
http://ec.europa.eu/budget/library/biblio/publications/2011/fin_report/fin_report_11_en.pdf
- Europäische Kommission*: The Second Economic Adjustment Programme for Greece. März (2012a)
- Europäische Kommission, Wirtschaft und Finanzen*: Statement by the President of the Eurogroup. 25. Juni (2012b)
http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_Data/docs/pressdata/en/ecofin/131176.pdf
- Europäische Kommission*: The Financial Sector Adjustment Programme for Spain, Oktober (2012c)
- Europäischer Rat*: Statement by the Eurogroup and ECOFIN Ministers. 28. November (2010)
http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ecofin/118051.pdf
- Europäischer Rat*: Europäischer Rat 24./25. März 2011 – Schlussfolgerungen. (2011)
http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/de/ec/120313.pdf
- Europäischer Rat*: Treaty Establishing the European Stability Mechanism (ESM). 2. Februar (2012)
<http://european-council.europa.eu/media/582866/02-tesm2.de12.pdf>, (ESM-Vertrag)
- European Financial Stability Facility (EFSF)*: Rahmenvertrag
http://www.efsf.europa.eu/attachments/20111019_efsf_framework_agreement_en.pdf
- European Stability Mechanism*: Investor Presentation. Oktober (2012)
http://www.esm.europa.eu/pdf/ESM%20Investor%20Presentation_15102012.pdf
- GAUWEILER, P.: Wo ist das Gold der Deutschen? Süddeutsche Zeitung 20. Mai (2012a)
<http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/deutsche-goldreserven-wo-ist-das-gold-der-deutschen-1.1360882>
- GAUWEILER, P.: Bundesbank verspielt Vertrauen. Interview. Focus 30. Mai (2012b)
http://www.focus.de/fi_nanzen/banken/interview-bundesbank-verspielt-vertrauen_aid_759921.html
- International Monetary Fund*: IMF Country Report No. 12/57 (2012a)
- International Monetary Fund*: IMF Members' Quotas and Voting Power, and IMF Board of Governors. (2012b)
<http://www.imf.org/external/np/sec/memdir/members.aspx#total>
- KOHLER, W.: Zahlungsbilanzkrisen im Eurosystem: Griechenland in der Rolle des Reservewährungslandes? ifo Schnelldienst 64/16, 31. August, S. 12–19 (2011)
- NEUMANN, M. J. M.: Geldwertstabilität: Bedrohung und Bewährung. In: *Deutsche Bundesbank* (Ed.): 50 Jahre Deutsche Mark – Notenbank und Währung in Deutschland seit 1948. München: Beck 1998
- Rat der Europäischen Union*: Verordnung (EU) Nr. 407/2010 des Rates vom 11. Mai 2010 zur Einführung eines europäischen Finanzstabilisierungsmechanismus. ABl. 53, 2010, Nr. L 118, 11. Mai (2010)
- Rat der Europäischen Union*: Council approves aid to Portugal, sets out conditions", 17. Mai (2011a)
http://europa.eu/rapid/press-release_PRES-11-132_en.htm.
- Rat der Europäischen Union*: Erklärung der Staats- und Regierungschefs des Euro-Währungsgebiets und der EU-Organe. 21. Juli (2011b)
http://europa.eu/rapid/press-release_DOC-11-5_en.htm?locale=de
- Rat der Europäischen Union*: Erklärung des Euro-Gipfels. 8. November (2011c)
http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/de/ec/125662.pdf
- Rat der Europäischen Union*: Erklärung der Eurogruppe. 21. Februar (2012a)
http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Europa/Euro_auf_einen_Blick/2012-02-22-zweites-hilfsprogramm-fuer-griechenland-nimmt-erste-huerde-anlage2.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- Rat der Europäischen Union*: Eurogroup Statement on Spain. 9. Juni (2012b)
http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/en/ecofin/130778.pdf
- Republik Zypern*, Press and Information Office: Request for External Financial Assistance. 25. Juni (2012)
<http://www.moi.gov.cy/moi/pio/pio.nsf/All/D8F72885916FDF3DC2257A28005B84B7?Opendocument>
- SINN, H.-W.: Neue Abgründe. Wirtschaftswoche Nr. 8, 21. Februar, S. 35 (2011a)
- SINN, H.-W.: Tickende Zeitbombe. Süddeutsche Zeitung Nr. 77, 2. April, S. 24 (2011b)
- SINN, H.-W.: Die riskante Kreditersatzpolitik der EZB. Frankfurter Allgemeine Zeitung Nr. 103, 4. Mai (2011c)
- SINN, H.-W.: The ECB's Stealth Bailout. VoxEU, 1. Juni (2011d)
- SINN, H.-W.: Die Target-Falle: Gefahren für unser Geld und unsere Kinder. München: Hanser 2012a
- SINN, H.-W.: Die Europäische Fiskalunion. Perspektiven der Wirtschaftspolitik 13/3, 137–178 (2012b)

- SINN, H.-W., und FEIST, H.: Eurowinners and eurolosers: The distribution of seignorage wealth in EMU. *European Journal of Political Economy* 13, 665–689 (1997)
- SINN, H.-W., and WOLLMERSHÄUSER, T.: Target Loans, Current Account Balances and Capital Flows: The ECB's Rescue Facility. NBER Working Paper 17626, November, CESifo Working Paper 3500, Juni (2011a)
- SINN, H.-W., und WOLLMERSHÄUSER, T.: Target-Kredite, Leistungsbilanzsalden und Kapitalverkehr: Der Rettungsschirm der EZB. Ifo Working Paper No. 105, 24. Juni (2011b)
- SINN, H.-W., und WOLLMERSHÄUSER, T.: Target loans, current account balances, Capital flows and the ECB's rescue facility. *International Tax and Public Finance* 19, 468–508 (2012)
- TORNELL, A., und WESTERMANN, F.: Greece: The Sudden Stop that Wasn't. *VoxEU*, 28. September (2011)
- WOLF-DOETTINCHEM, L., und WIECHMANN, J. C.: Der letzte Schatz der Deutschen. *Stern*, 1. Juli, (2004)
<http://www.stern.de/wirtschaft/news/maerkte/goldreserve-der-letzte-schatz-der-deutschen-526129.html>

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Hans-Werner SINN
Professor für Nationalökonomie und Finanzwissenschaft
an der Ludwig-Maximilians-Universität München
Präsident des ifo Instituts
ifo Institut-Vorstandsbereich
Poschingerstraße 5
81679 München
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 92241276
Fax: +49 89 92241901
E-Mail: sinn@ifo.de

Welternährung im Globalen Wandel

Joachim VON BRAUN (Bonn)

Mit 3 Abbildungen und 3 Tabellen



Zusammenfassung

Die Zahl der hungernden Menschen hat sich in den letzten 15 Jahren von ca. 780 Millionen auf 840 Millionen erhöht. Die Weltbevölkerung wird bis 2050 von derzeit 7 Milliarden auf ca. 9 Milliarden zunehmen, hauptsächlich in Afrika und Asien, wo jetzt schon die meisten Unter- und Fehlernährten leben und wo die Wasserknappheit die Agrarentwicklung begrenzt. Aus dieser Nachfragesituation resultieren zum einen langfristige Belastungen für die Ressourcennutzung bei Wasser und Land und zum anderen erhöhte kurzfristige Volatilität in den Food-Märkten. So sind seit 2006 die Agrarpreise deutlich gestiegen und volatiler geworden. Die Getreidenachfrage ist rascher gestiegen als das Angebot, womit die weltweiten Getreidevorräte geschrumpft sind, was zur Nervosität an den Märkten führte. Hohe und nicht-nachhaltige Wassernutzung wirkt sich zunehmend begrenzend auf die Welternährung aus. Der Vortrag behandelt die komplexen Auslöser der Welternährungskrisen 2008–2011 und deren Konsequenzen, die Zusammenhänge zwischen langfristigen Ressourcenproblemen und kurzfristigen Entwicklungen der Welternährung und Wasserversorgung, sowie Bedarf an politischem Handeln und Forschung.

Abstract

The number of under nourished people increased in the past 15 years from an estimated 780 Million to 840 Million. World population will increase from the current 7 Billion to about 9 Billion by 2050. That increase will mainly be in Africa and Asia, where most of the undernourished and malnourished live today and where water shortage is a constraint to agricultural growth. The growing demand for food increases the long term pressure on resources, especially water and land, and raises short term volatility in food markets and prices. Short- and long term challenges are connected. Prices have increased since 2006 and became more volatile. Demand increased faster than supply and stocks declined as a consequence, leading to more nervous markets. High and unsustainable water use in agriculture is a growing problem for the world food situation. The presentation will address the complex triggers of the food crisis 2008–2011, interrelationships between long term resource problems, i. e. water, and short term food problems, and needed policy action and research.

1. Welternährung – Wissenschaftsgeschichte und Konzept

Die Ernährung der Weltbevölkerung hat sich in den vergangenen 50 Jahren für einen wachsenden Anteil und eine zunehmende Anzahl der Erdenbürger deutlich verbessert, die absolute Zahl der Hungernden und Fehlernährten sinkt jedoch nur langsam. Dieser im Ganzen positive Trend wird allerdings durch krisenhafte ökonomische, politische und umweltbedingte Ereignisse unterbrochen. Besonders in den vergangenen fünf Jahren seit der Welternährungskrise von 2007/2008 hat sich das Welternährungsproblem verschärft. In einer nunmehr viel reicheren Welt kann Hunger und Unterernährung immer weniger als eine Geißel der Menschheit hingenommen werden, und auch die Betroffenen oder Bedrohten werden Nahrungsmittelknappheit nicht mehr akzeptieren, sondern über Grenzen hinweg global immer besser informiert und vernetzt ihre Stimmen erheben. Somit hat sich nicht nur das Ernährungsproblem gewandelt, sondern auch die politische Ökonomie rund um die Problemlage.

1.1 Zur Geschichte der Welternährungsforschung

Die wissenschaftliche Forschung auf dem Gebiet der Welternährung hat beachtliche Fortschritte zu verzeichnen. Dies gilt sowohl für die naturwissenschaftliche Forschung (z. B. Technologien wie Pflanzen- und Tierzucht, Genetik) und die Ressourcenforschung (z. B. Bewässerung, Landnutzung, Klima etc.) als auch für die wirtschaftswissenschaftliche Ernährungsforschung (z. B. agrar-ökonomische Modelle, Wertschöpfungsketten, institutionelle Innovationen zu Risikomanagement und sozialen Transfers) und die neuere interdisziplinäre Forschung (wie z. B. Verknüpfungen zwischen Ernährungs-, Gesundheits- und ökonomischer Forschung zur Adressierung der Probleme frühkindlicher Unterernährung). All dies hat zur Klärung von Ursachen und breiterem Angebot an Lösungen des Welternährungsproblems beigetragen. Bis jetzt wird dies in der breiteren Öffentlichkeit allerdings noch wenig wahrgenommen.

Die Wissenschaftsgeschichte zum Thema „Ernährungskrisen“ hat seit Thomas MALTHUS, der den Konflikt zwischen Bevölkerungswachstum und Produktionswachstum als zentrales Problem ansah und dessen Thesen bei Ernährungskrisen stets in Erinnerung gerufen werden, keineswegs stagniert. Insbesondere in den vergangenen fünf Jahrzehnten hat die Forschung neue Einsichten erarbeitet. Die Wissenschaftsgeschichte der sozial-ökonomischen Ernährungsforschung ist dabei nicht isoliert, sondern in Interaktion mit der wirtschaftlichen Entwicklung und der Geschichte des Hungers vorangeschritten:

- Um 1800: Nach T. R. MALTHUS (1798, 1820) waren vor der Entwicklung und Umsetzung neuer produktivitätssteigernder Technologie Bevölkerungswachstum *versus* Produktion die fundamentalen Faktoren des wirtschaftlichen Wachstums.
- In den 1920er und 1940er Jahren: Rationierung, Kalorien-Management, Lebensmittelkartensysteme, Speisungsprogramme wurden im und nach dem Ersten und Zweiten Weltkrieg und in der Weltwirtschaftskrise in Europa, Japan, Arabien, Indien etc. eingeführt und danach perpetuiert.
- In den 1960er Jahren wurde der Schwerpunkt auf die Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln angesichts der expandierenden Hungerproblematik in Asien gelegt. Es kam zur „Grünen Revolution“ durch Norman BORLAUG, mit der Züchtung von hochertragreichem Weizen, wofür er den Friedensnobelpreis 1970 erhielt (VIETMEYER 2011).

- In den 1970er Jahren stand die Bedeutung der Rolle von Anreizen und Marktzugang für die (Klein-) Bauern im Vordergrund. T. W. SCHULTZ (1964) arbeitete an „Transforming Traditional Agriculture“ und erhielt u. a. dafür den Ökonomie-Nobelpreis 1979. Weitere wissenschaftliche Erkenntnisse diverser Wissenschaftler aus Analysen der politisch induzierten großen Hungersnöte in China (1959/60) und zuvor in der Sowjetunion (1920er Jahre) erscheinen.
- In den 1980er Jahren sorgte Forschung von Amartya SEN (1982), die Rechte („entitlements“) und Zugang zu Nahrung in den Vordergrund stellte, für weiteres Umdenken und ergänzte die bis dato vorherrschende angebotsseitige Betrachtung. Er erhielt den Ökonomie-Nobelpreis 1998. Arbeiten zu den komplexen Agrar-, Markt- und Politikbedingungen als Ursachen von Hungersnöten in Afrika erscheinen. Frühwarnsysteme und effektivere Interventionen in akuten Hungersnöten in Afrika werden entwickelt und eingeführt.
- In den 1990–2000er Jahren herrscht Optimismus angesichts der Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in globalen (FAO, UNICEF, IFPRI etc.) Konferenzen, und globale Ziele zur Hungerreduzierung (1996 ... 2000 Gipfel – Millenniums-Ziele) werden postuliert.
- Die 2000er Jahre bringen die Entwicklung komplexerer Sichtweisen, adressiert mit wirtschafts- und gesundheitspolitischen Synthesen zu Ursachen und Konsequenzen von Welternährungsproblemen und mit interdisziplinärer Forschung, sowie neue Erkenntnisse zur Beziehung zwischen Ressourcenknappheit (Wasser, Land), Bioökonomie und Ernährung (Nexus-Sichtweisen). Ausgelöst durch die Ernährungskrise von 2007/2008 werden Finanzmarkt und Nahrungsmittel-Preis-Beziehungen und deren Wirkungen auf die Ernährung vermehrt berücksichtigt. Eine Rückbesinnung auf die Notwendigkeit vermehrter Produktivitätssteigerung beginnt.

Während Wasserforschung und diesbezügliche Innovation auf dem Gebiet der Bewässerung seit Jahrtausenden an historischen Standorten wie Ägypten, Persien und China betrieben wird, ist die sozial-ökonomische Forschungsgeschichte um das globale Wasserproblem jünger als die des Welternährungsproblems, und der enge Zusammenhang zwischen Wasser und Ernährung ist erst in den vergangenen 30 Jahren vermehrt ins Zentrum der Ernährungsforschung gerückt. Dazu zählt nun auch die Forschung zum Zusammenhang zwischen globalem Klimawandel, Energienutzung und Wasserverfügbarkeit, die diese Zusammenhänge als „Nexus“ von Wasser-Sicherheit, Energie-Sicherheit und Ernährungs-Sicherheit begriff und die Synergie zwischen diesen drei Bereichen betont.

1.2 Rahmen und Konzept der Welternährungsforschung heute

Die Welternährungsforschung hat sich in den vergangenen 200 Jahren oftmals von der akuten Lage treiben lassen und nicht von Voraussicht. Dies gilt insbesondere für die geringe Aufmerksamkeit für langfristigen Bedarf an forschungsbasiertem technischem Fortschritt, der nachhaltige Intensivierung ermöglicht, und für die Unterschätzung der Bedeutung von Food-Markt-Interaktionen, wie dem Markt für Futtermittel sowie in neuerer Zeit dem Energiemarkt und Finanzmarkt. So haben die Ernährungskrisen von 2007/2008 und 2010/2011 viele überrascht und wurden kaum vorab als neue Risikoszenarien identifiziert.

Heute sind die Welternährungsprobleme in folgendem Bündel von Ursachenkomponenten zusammengefasst, wobei die Komponenten interagieren und kontextspezifisch sind und jeweils unterschiedliche Gewichtung in Ernährungskrisen haben:

- zunehmenden Ressourcenbeschränkungen (Boden, Wasser, Energie mit zunehmender Wirkung von Klimawandel);
- Mangel an technischem Fortschritt;
- rasch wachsende und sich wandelnde Konsumnachfrage;
- unzureichende Nahrungsqualität zu erschwinglichen Preisen;
- vermehrte Einkommensungleichheit, verbunden mit Unfähigkeit der absolut Armen, auf Preis- und Einkommensschocks zu reagieren;
- unzureichend funktionierende Produkt- und Finanzmärkte; sowie
- politische Konflikte, Kriege und schlechte Regierungsführung.

Allerdings wirken diese Komponenten sich auf sehr verschiedenen Zeitachsen aus, bringen also ihre Bedeutung in sehr unterschiedlichen lang- und kurzfristigen Zeiträumen zum Ausdruck:

Langfristig (Jahr/Jahrzehnte):

- Langfristige Ernährungsprobleme kommen im Ernährungszustand zum Ausdruck (Kleinwüchsigkeit, „stunting“).
- Langfristige Agrar- und Ernährungssystemprobleme ergeben sich aus strukturellen Faktoren wie Landknappheit, Bodendegradation, Wasserknappheit, Klima, Technologie, mangelnden Investitionsanreizen, politischen Konflikten.

Mittelfristig (Monate):

- Mittelfristige Ernährungsprobleme zeigen sich in Nährstoffdefiziten (Kalorien, Mikronährstoffe).
- Sie resultieren aus Armut, Beschäftigungsmangel, Wetter (z. B. Dürre), Lagerhaltung, saisonaler Knappheit in der Nahrungsverfügbarkeit und handelspolitischen Reaktionen, wie Export-Stopps.

Kurzfristig (Wochen, Tage):

- Kurzfristige Ernährungsschocks kommen in akuter Untergewichtigkeit zum Ausdruck, insbesondere im frühkindlichen Alter.
- Sie können aus mangelnder Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln, dem Zusammenbruch von Kaufkraft, z. B. wegen Preisschocks in überreagierenden Warenterminmärkten, aber auch aus akuten kriegerischen Konflikten, die Nothilfe nicht zulassen, sowie Naturkatastrophen (Überschwemmungen) und Infektionskrankheiten resultieren.

Wir müssen somit die Lösungen der diversen Welternährungsprobleme auf der Grundlage langfristiger und mittel- bzw. sehr kurzfristiger Ursachenanalyse identifizieren. Dabei sind kurzfristige Krisen, wie Preisschocks, zum Teil auch Symptome langfristiger struktureller Probleme, wie Politikversagen, veränderte Ressourcenknappheit, insbesondere bei Wasser und Land, sowie mangelnder Verfügbarkeit von produktivitätssteigernder Technologie. Die Integration von kurz- und langfristiger Analyse und entsprechender Auswahl von angemessenen Politikmaßnahmen stellt eine besondere Herausforderung dar.

1.3 Die Welternährungsgleichung

Die Tabelle 1 führt die wesentlichen Komponenten der Welternährungsgleichung auf. Wachsende Dynamik auf der Nachfrageseite der Gleichung traf vor allem im vergangenen Jahrzehnt auf nicht hinreichende Expansion auf der Angebotsseite, und daraus resultieren die bekannten Preissteigerungen.

Tab. 1 Welternährungsgleichung und ihre Komponenten (global)

Nahrungsangebot	=	Nahrungsnachfrage
Land		Bevölkerung
Wasser	Handel und	Einkommen
Inputs und Technik	Märkte	Armut und Ungleichheit
Arbeit	Supermärkte	Verbraucherverhalten
Farm-Strukturen	Finanzmärkte	Verluste und Verschwendung
Klimawandel	Lagerhaltung	Bioenergie

Eine globale Welternährungsgleichung, die sich auf niedrigem Niveau ausgleichen muss, führt zudem zu Friktionen im Handel und zu Volatilität auf den Märkten und löst vermehrte Spekulation und erratische Politikreaktionen aus, wie Exportbeschränkungen, die 2008 die Krise geschürt haben. Das Niveau der Welternährungsgleichung, das vor allem von strukturellen Faktoren bestimmt wird, hat somit starke Auswirkungen auf die oben genannten mittel- und kurzfristigen Ausprägungen der Welternährung.

Diese stilisierte Welternährungsgleichung stellt den konzeptionellen Rahmen für dieses Kapitel bereit, und die Kapitelstruktur wird durch die genannten lang- und kurzfristigen Aspekte des Welternährungsproblems bestimmt. Zunächst sei aber kurz auf die verschiedenen Komponenten des Welternährungsproblems eingegangen. Das Problem der Weltwasserversorgung ist mit dem der Welternährung eng verbunden, denn ca. 70% des Welt-süßwassers werden von der Landwirtschaft genutzt. In diesem Artikel wird Wasser allerdings nur am Rande behandelt, um den Rahmen nicht zu sprengen.

2. Zur Situation der Welternährung

Das Welternährungsproblem wird oft stark vereinfachend als das Problem des Kalorienmangels („Hunger“) der Armen beschrieben. Hunger ist zwar eine zentrale Komponente des Welternährungsproblems, aber das Problem der Welternährung ist weitaus komplexer und größer (Tab. 2). Obwohl in den Industrieländern beim Stichwort Hunger vor allem an Afrika gedacht wird, leben die meisten hungernden Menschen in Asien. Allein in Indien sind 255 Millionen Menschen nicht ausreichend mit Kalorien versorgt, gefolgt von China, wo ca. 140 Millionen Menschen hungern (FAO 2012). Setzt man jedoch die Zahl der Hungernden ins Verhältnis zur Gesamtbevölkerung, wird deutlich, dass Afrika tatsächlich das größte Problem hat: Jeder dritte Mensch in Afrika südlich der Sahara leidet an chronischem Hunger.

Tab. 2 Die vier Problemlagen der Welternährung

Problemlagen	Ursachen	Anzahl der Betroffenen
1. Unterernährung (Hunger) oft in Interaktion mit Infektionskrankheiten	Defizit an Kalorien und Proteinen	ca. 840 Millionen
2. Mangel an Mikronährstoffen	Unzureichende Versorgung mit Vitaminen und Mineralstoffen, wie Vitamin A, Eisen, Jod, Zink	ca. 2 Milliarden
3. Untergewicht bei Geburt, Wachstums und Gewichtsverfall in den ersten Lebensjahren	Mangelernährung von Müttern; mangelnde Pflege und Gesundheitsprobleme; verkürztes Stillen	ca. 146 Millionen Kinder
4. Übergewicht und resultierende chronische Krankheiten	Überhöhter Konsum von Kalorien (oft bei gleichzeitigem Mangel an Vitaminen und Mineralstoffen)	ca. 1 Milliarden (davon 300 Millionen „clinicalobese“)

Noch mehr Menschen sind von einer Unterversorgung mit spezifischen Mikronährstoffen betroffen. Geschätzte zwei Milliarden Menschen leiden an Eisenmangel, vor allem Frauen und Kinder, sowie der Zink- und Jodmangel und auch der Mangel an Vitamin A und anderen Vitaminen ist weit verbreitet. Die Unterversorgung mit Nahrung und Mikronährstoffen führt zu erhöhter Sterblichkeit und Anfälligkeit für Infektionskrankheiten (insbesondere bei Kleinkindern), ebenso wie zur Beeinträchtigung der körperlichen und geistigen Entwicklung. Besonderes Augenmerk erfordert der Zusammenhang zwischen Ernährung und Kleinkinder- und Säuglingssterblichkeit. Mangelernährung gilt für die meisten Krankheiten als potenzierender Faktor. Auf der anderen Seite tragen Erkrankungen auch zu den hohen Mangelernährungsraten bei Kleinkindern in Entwicklungsländern bei. Die Prävalenz von Durchfallerkrankungen ist besonders in den Gebieten hoch, in denen die Versorgung mit Trinkwasser und sanitären Anlagen defizitär ist, wie in Afrika und Südasien. Menschliche Gesundheit und wirtschaftliches Wachstum sind eng miteinander korreliert, so dass das Welternährungsproblem auch eine Ursache wirtschaftlicher Fehlentwicklung ist.

3. Langfristige Perspektiven der Welternährung und Wasserversorgung

3.1 Bevölkerung und Einkommen

Die zukünftige Welternährungslage wird maßgeblich davon abhängen, wie sich Nachfragenachfrage und -angebot weiter entwickeln, bzw. deren prägende Bestimmungsfaktoren.¹ Auf der Nachfrageseite spielen vor allem Bevölkerungs- und Einkommensrends eine entscheidende Rolle. Das weltweite Bevölkerungswachstum verlangsamt sich zwar im Zeitablauf, derzeit beträgt der jährliche Zuwachs aber immer noch ca. 70 Millionen Menschen.

¹ Siehe Welternährungsgleichung in Tabelle 1

Die mittleren Projektionen der Vereinten Nationen gehen davon aus, dass bis 2050 ca. 9,3 Milliarden Menschen auf der Erde leben werden. Eine Weltbevölkerung von ca. 9 Milliarden wird 2050 vergleichsweise so viele Nahrungsmittel konsumieren, wie sie dem heutigen Verbrauch von 12 Milliarden Menschen entsprechen, denn die Essensgewohnheiten wandeln sich mit steigendem Einkommen weltweit. Wachsende Mittelschichten in vielen Entwicklungs- und Schwellenländern fragen verstärkt höherwertige und verarbeitete Nahrungsmittel nach, die sie zunehmend in Supermärkten kaufen. Beispielsweise hat sich der Pro-Kopf-Fleischkonsum in China in den vergangenen 15 Jahren verdoppelt; der Konsum von Milch und Milchprodukten hat sich sogar mehr als verdreifacht. Ähnliche Trends sind auch in anderen Ländern mit hohem Wirtschaftswachstum zu beobachten oder für die Zukunft zu erwarten. Die Fleischproduktion findet zunehmend auf Getreide- und Ölsaatenbasis statt und weniger auf Weidewirtschaft. Bevölkerungs- und Einkommenswachstum zusammen mit geänderten Präferenzen werden die Nahrungsnachfrage bis 2030 um mindestens 50 % erhöhen und bis 2050 verdoppeln.

Fast 80 % aller hungernden Menschen leben im ländlichen Raum und sind direkt oder indirekt von der Landwirtschaft abhängig. 50 % aller Hungernden sind Kleinbauernhaushalte, die selbst Nahrungsmittel produzieren, aber deren Ressourcen zu begrenzt sind, um ausreichend Nahrungsmittel zu produzieren oder zu kaufen. Im Zuge der Urbanisierung wird sich das Bild wahrscheinlich verändern, aber für die nächsten Jahrzehnte ist zu erwarten, dass Hunger weiterhin im ländlichen Raum überwiegen wird, weil dort die armen Menschen konzentriert sind. Insofern ist Einkommenssteigerung in den Entwicklungsländern ein wesentlicher Ansatzpunkt, um den Hunger zu bekämpfen. Die Nachfrage nach Nahrungsmitteln verändert sich jedoch im Zeitablauf auf Grund von Bevölkerungs- und Einkommensentwicklungen und bestimmt damit bei gegebener Produktion die Preisentwicklung mit. Somit muss das Hungerproblem auch immer als ein Angebots- und Produktionsproblem verstanden werden.

3.2 Produktion, Produktivität und Innovation

Produktivitätswachstum steigert die lokale Nahrungsverfügbarkeit, erhöht Beschäftigung und Einkommen für Bauern und Landarbeiterfamilien und ermöglicht damit auch einen verbesserten Zugang zu Nahrung und anderen überlebenswichtigen Gütern. Landwirtschaftliches Wachstum führt in den Entwicklungsländern zu einem deutlich überproportionalen Anstieg im Haushaltseinkommen der ärmsten Bevölkerungsschichten. Folglich trägt landwirtschaftliches Wachstum im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren sowohl zur Armutsreduktion als auch zu einer ausgeglicheneren Einkommensverteilung bei.

Entgegen dieser Erkenntnis wurde der Agrarsektor in den Entwicklungsländern oft durch ungünstige Preispolitiken benachteiligt, und öffentliche Investitionen flossen eher in städtische Regionen und Industriesektoren, um städtische Eliten zufriedenzustellen oder das Ziel der Industrialisierung vorschnell voranzutreiben. In China und Indien führte diese Entwicklung in den frühen 1960er Jahre zu großen Hungersnöten. Es gibt weltweit kaum Beispiele, bei denen wirtschaftliches Wachstum und Industrialisierung ohne die Entwicklung des Agrarsektors erreicht worden wäre. Besonders deutlich wurde dies in China in den 1980er Jahren, wo sich rasches Agrarwachstum nach den Wirtschaftsreformen von 1979, die den Bauern mehr marktwirtschaftliche Möglichkeiten einräumten, dann in gesamtwirtschaftliche Entwicklung transformierte.

Enorme Produktionssteigerungen auf globaler Ebene werden erforderlich sein, um die Nachfrage nach Nahrungsmitteln decken zu können, die sich bis 2050 ungefähr verdoppeln wird. Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen: zum einen über eine Ausdehnung der Ackerfläche und zum anderen über eine Steigerung der Erträge auf der bestehenden Fläche. Die erste Möglichkeit, nämlich Flächenausdehnungen über die heute global vorhandenen und landwirtschaftlich genutzten rund 1,4 Milliarden ha Fläche hinaus, ist kaum möglich. Weltweit gehen jährlich ca. 10 Millionen ha Ackerland durch Erosion und Degradation verloren, und auch die rasch zunehmende Verstädterung verbraucht zusätzliche Landressourcen. Ferner stellt der Klimawandel eine nicht zu unterschätzende Herausforderung für die Agrarproduktion dar. Südasien und Subsahara-Afrika werden vermutlich besonders davon negativ betroffen sein – also diejenigen Regionen, wo schon jetzt die meisten hungernden Menschen leben.

Folglich muss die notwendige Produktionssteigerung in erster Linie über höhere Erträge erreicht werden. Höhere Erträge sind prinzipiell durch intensivere Produktion und technischen Fortschritt möglich. Längerfristig werden sich die Erträge jedoch nur dann nachhaltig steigern lassen, wenn neue Nutzpflanzensorten und Technologien entwickelt werden, die an den Standort angepasst sind und knappe Ressourcen – insbesondere Wasser und Böden – effizient und nachhaltig nutzen. Ansätze für die Züchtung von Pflanzen mit größerer Toleranz gegenüber Dürre, Hitze und Bodenversalzung sind bereits vorhanden, was vor allem vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels vorteilhaft ist. Mit Blick auf die Ernährungsprobleme sind auch Grundnahrungspflanzen mit höheren Mikronährstoffgehalten von Bedeutung, die gesunde Nahrung zu erschwinglichen Preisen ermöglichen. An vielen Standorten in den Entwicklungsländern – vor allem in Afrika – könnte ein höherer und effizienterer Einsatz von Düngung und Pflanzenschutz die Erträge deutlich steigern.

Die Zunahme der Getreideerträge – eine wichtige Grundlage der Ernährungssicherung – zeigt für die Weltregionen große Unterschiede im Zeitablauf (Abb. 1). Hier fallen deutliche Ertragslücken zwischen den Industrie- und Entwicklungsländern auf, die sich nur teilweise durch klimatische und agrarökologische Faktoren erklären lassen. Ein Großteil der Abweichungen lässt sich aber auf unterschiedliche Technologieniveaus zurückführen. Eine substantielle Verbesserung der angewandten Technologien wird also für die notwendige Produktionssteigerung die Hauptrolle spielen müssen – das gilt für Afrika und andere Teile der Welt (QAIM 2009, *Weltbank* 2007).

Die beachtlichen weltweiten Ertragssteigerungen, die bis in die 1980er Jahre zu beobachten waren, sind das Ergebnis gezielter Agrarforschung und -entwicklung. In den letzten zwanzig Jahren verlor die internationale Agrarforschung an Bedeutung, und damit reduzierte sich die finanzielle Förderung. Diese Forschungsdefizite zeigen jetzt deutliche Wirkungen auf globaler Ebene. Die weltweite Getreideproduktion steigt zwar nach wie vor an, aber die Ertragszuwächse sind in den letzten zwanzig Jahren zurückgegangen. Während die jährlichen Wachstumsraten in den 1970er und 1980er Jahren teilweise noch über 3% lagen, liegen sie heute insbesondere für Weizen und Reis bei unter 1%. Das ist zu wenig, um mit der langfristigen Nachfrageentwicklung Schritt halten zu können.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts hat die Agrarforschung neue Schubkraft durch grundlegend neue wissenschaftliche Erkenntnisse erhalten. Landtechnik, Bodenbearbeitung, innovative Tierernährung und -haltung sowie die Ökonomie von Betrieb, Standort und Agrarsektor in der Volkswirtschaft sind bahnbrechend für die Transformation der Agrar-

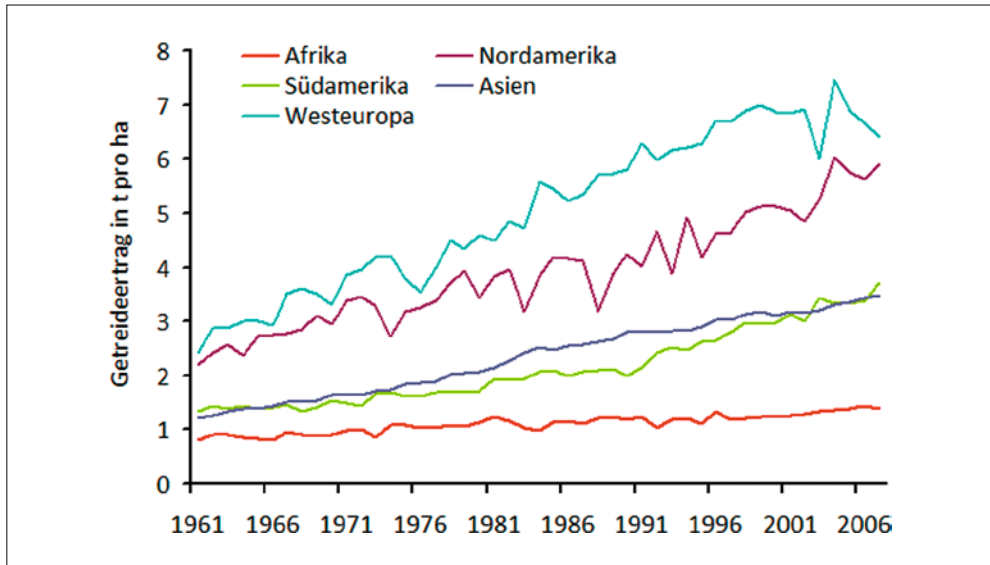


Abb. 1 Regionale Ertragsentwicklungen 1961–2007. Quelle: nach Daten der FAO 2012

wirtschaft gewesen. Im Bereich der tierischen Veredelung konnte die Futterverwertung gesteigert werden. In Ländern und Regionen mit relativ großen Betrieben hat die Bedeutung von *Precision Farming*, d.h. Computer- und GPS (*Global Positioning System*)-gesteuerte Wahl der genauen Zuteilung von Produktionsmitteln, zugenommen. In der kleinbäuerlichen Landwirtschaft spielen neue Sorten und verbesserte Managementformen eine wichtige Rolle. Insbesondere im pflanzlichen Bereich versprechen Genomik, markergestützte Selektion und Grüne Gentechnik die Entwicklung neuer, leistungsfähigerer Sorten mit verbesserter Anpassung an Stressfaktoren wie Toleranz gegen Wasserstress, Hitze und Bodenversalzung. Das ist vor allem vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels vorteilhaft.

3.3 Klimawandel und Ernährungslage

Eine große Herausforderung für das Niveau und die Risiken der Agrarproduktion stellt der zunehmende Klimawandel dar. Die möglichen Konsequenzen sind inzwischen mit umfangreichen Modellsimulationen über seine Auswirkungen auf die globale Landwirtschaft untersucht worden (insbesondere TUBIELLO und FISCHER 2007, NELSON et al. 2009). Weltweit rechnen TUBIELLO und FISCHER (2007) mit einer Nettoverringerung der Getreideproduktion um ca. 1 % bis zum Jahr 2080. Allerdings prognostizieren sie erhebliche regionale Unterschiede. Während die Getreideproduktion in den Industrieländern durch Klimaveränderungen voraussichtlich sogar leicht zunehmen könnte, wird sie in den Entwicklungsländern deutlich abnehmen. Besonders betroffen im negativen Sinne werden Südasien und Subsahara-Afrika sein – also diejenigen Regionen, wo schon jetzt die meisten armen und hungernden Menschen leben. Die weltweit im Agrarbereich realisierte Wertschöpfung könnte sich bis 2020 durch die Erderwärmung um 16 % reduzieren. Wiederum werden die ärmsten

Länder am stärksten betroffen sein. Während die Wertschöpfung in den Entwicklungsländern nach diesen Analysen um 20% zurückgehen wird, nimmt sie in den Industrieländern lediglich um 6% ab (TUBIELLO und FISCHER 2007). NELSON et al. (2010) rechnen mit erheblichen klimabedingten Getreidepreissteigerungen in den nächsten 30 Jahren, selbst bei vermehrter Investition in Produktivitätssteigerung. Bisher sind alle Prognosen, wie sich der Klimawandel auf die landwirtschaftliche Wertschöpfung auswirkt, noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Allerdings wäre es riskant, auf die mit diesen Analysen aufgezeigten Risiken nicht schon jetzt mit Strategien für Anpassungsmaßnahmen zu reagieren, um die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern. Neben allgemeinen ertragssteigernden Technologien müssen Innovationen entwickelt werden, die Nutzpflanzen und Tiere widerstandsfähiger gegen Wetterextreme machen.

3.4 Energie, Biotreibstoffe und Welternährung

Die steigenden und oft schwankenden Energiepreise wirken sich als teure landwirtschaftliche Inputkosten über die Angebotsseite der Welternährungsgleichung auf die Welternährung aus. Zugleich verändern sie die Nachfrageseite der Gleichung, denn erhöhte Energiepreise induzieren vermehrte Bioenergieproduktion, was teilweise zu Lasten der Nahrungs- und Futtermittelverfügbarkeit geht. Diese unsichere, von Importen abhängige und teure Energieversorgung in den Industrieländern, die aus dem Bemühen heraus geboren wurde, den Gebrauch von fossilen Energiequellen und risikoreicher Kernenergie einzuschränken, hat dazu geführt, in einer zunehmenden Produktion von Biotreibstoffen eine Lösung zu suchen. In der EU und den USA wird dieser Trend durch Quoten oder Subventionen gefördert. Ohne diese politische Unterstützung wäre die Produktion von Biotreibstoffen zumeist nicht wettbewerbsfähig. Anders ist die Situation in Brasilien und einigen anderen Ländern, wo die Erzeugung von Bioethanol aus Zuckerrohr auch ohne staatliche Förderung wettbewerbsfähig ist.

Es ist davon auszugehen, dass bei steigenden Energiepreisen die Biotreibstoffnutzung weltweit weiter ansteigen wird. Längerfristig werden hierfür möglicherweise neue Pflanzen und Verfahren genutzt werden können, die auf Standorten wachsen, wo sie nicht mit Nahrungsmitteln konkurrieren (sogenannte 2. Generation der Bioenergie). Gegenwärtig gilt aber, dass alles, was Wasser und landwirtschaftlich nutzbare Fläche zur Bioenergieproduktion einsetzt, mit der Nahrungs- und Futtermittelproduktion konkurriert. Es gibt somit eine nicht zu vernachlässigende direkte und indirekte Konkurrenz zwischen „Tank und Teller“. An Warnungen für die Politik gegen den überzogenen Einsatz von Biomasse für Energie hat es nicht gefehlt, denn Simulationen zeigten schon vor der Welternährungskrise von 2008, dass eine starke Ausdehnung der weltweiten Biotreibstoffnutzung die Kalorienverfügbarkeit vor allem in den Entwicklungsländern bis 2020 deutlich verschlechtern würde (Abb. 2). Am stärksten betroffen wäre die Bevölkerung in Afrika, wo die Kalorienverfügbarkeit um mehr als 8% sinken würde. Insofern sollte staatliche Förderung von Biotreibstoffen überdacht und beendet werden.

Die Studien des Bioökonomierates (2012) und der Leopoldina (2012) haben beide darauf hingewiesen, dass Biomasse weltweit und insbesondere in Deutschland nicht unbegrenzt verfügbar und deshalb die Ressourcenbasis für Bioenergie begrenzt ist. Während die Leopoldina-Studie auf der Grundlage vorwiegend naturwissenschaftlicher Untersuchungen nahelegt, Bioenergie eher nicht weiter als Option für erneuerbare Energien zu verfolgen, rät

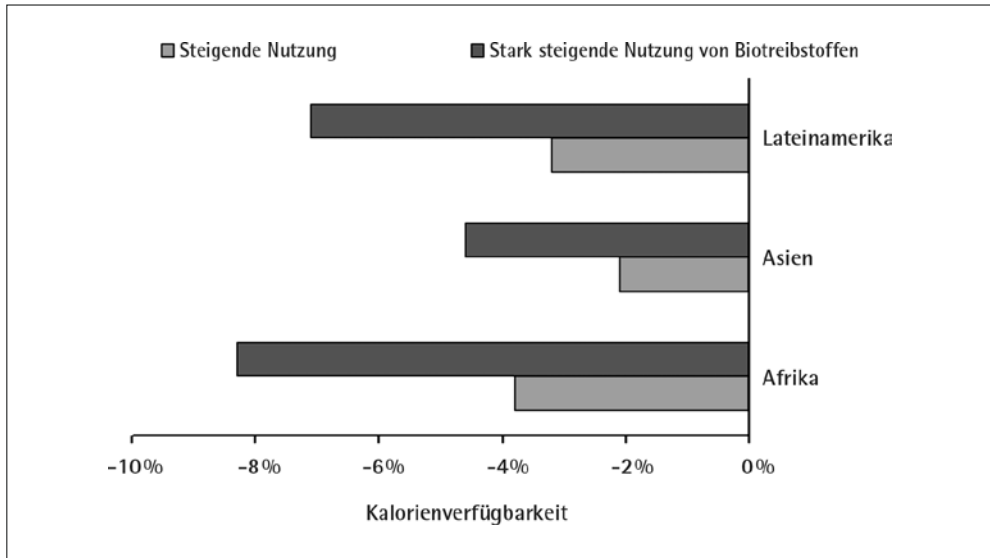


Abb. 2 Biotreibstoffe *versus* Nahrung: Szenario der Kalorienverfügbarkeit für Ernährung 2020. Quelle: von BRAUN 2008

die Studie des Bioökonomierates (2012) zu veränderten Forschungsprioritäten und Politik-anpassungen, um den Risiken starker Nutzung der Bioenergie für Welternährung, Umwelt und volkswirtschaftliche Effizienz zu begegnen. Die Studie des Bioökonomierates betont, „Biomasse von landwirtschaftlichen Nutzflächen soll in erster Linie zur Ernährungssicherung beitragen. Bei zunehmender Bedeutung der Biomasse als nachwachsender Rohstoff in der Energieumwandlung sowie in der industriellen Produktion konkurrieren diese Nutzungsformen mit der Ernährungssicherung der beständig anwachsenden Weltbevölkerung. Vor diesem Hintergrund sind Subventionen und Quotenregelungen schrittweise abzubauen. Die Knappheitssituation erfordert verstärktes Engagement in Forschung und Entwicklung zur nachhaltigen Steigerung der Biomasseproduktion.“ Und: „Die Förderung der Nutzung von Bioenergie muss sich auch an einer Nutzbarmachung der Stärken der Bioenergie orientieren. Diese bestehen in erster Linie in der Speicherung und Regelbarkeit. Daher sollte eine zukünftige Förderung diese Aspekte aufgreifen, damit Bioenergie im Rahmen des Gesamtversorgungssystems einen optimalen Beitrag leisten kann und die begrenzten Ressourcen – insbesondere Boden und Wasser – werthaltig eingesetzt werden.“ Ein Ende der Energienutzung von Biomasse ist weder realistisch noch empfehlenswert. Gleichwohl ist ein Umsteuern der verfehlten Förderpolitik aber notwendig.

3.5 Landpreise und Konkurrenz um Agrarland und Wasser

Als ökonomische Konsequenz aus den erhöhten Energie- und Agrarpreisen steigen die Preise für Landkauf und -pacht und auch die impliziten Preise für Wasser zur Bewässerung, die sogenannten Schattenpreise, die sich aus erhöhten Kosten für die Bereitstellung von Wasser errechnen. Die Preise für Boden sind insgesamt gestiegen, aber Preisunterschiede fluktuieren weltweit stark als Folge von variierender Bodengüte, Infrastruktur und

anderen Standortfaktoren. Diese Preisunterschiede reizen vermehrt zu Investitionen und spekulativem Engagement auf Landmärkten weltweit. Landnutzung für Bioenergie spielt dabei eine wichtige Rolle. Bodenkauf- und Pachtpreise haben sich im letzten Jahrzehnt in einigen Ländern Afrikas etwa vervierfacht, in Brasilien und Indien etwa verdreifacht und in England verdoppelt. Auch in Deutschland sind die Preise für landwirtschaftliche Nutzflächen in den vergangenen Jahren stark gestiegen (VON BRAUN 2010).

Hohe Preiserwartungen bei Nahrungsmitteln und die akute Erfahrung mit der Krise im Jahr 2008 haben dazu geführt, dass Länder, in denen Ackerland und Wasser knapp sind – wie die Golfstaaten –, versuchen, Land im Ausland zu kaufen oder zu pachten, um die Versorgung ihrer Bevölkerung sicherzustellen. Ferner investieren internationale Fonds vermehrt in Land und/oder die Produktion von Agrargütern, z. B. in Afrika. Das Ausmaß und die Schnelligkeit, mit der manche dieser Investitionsvorhaben geplant werden, und die intransparenten Konditionen, die vereinbart werden, haben in den Zielländern der Investitionen Widerstand hervorgerufen, insbesondere bei Kleinbauern und Viehhaltern mit unsicheren Eigentumsrechten. In vielen Entwicklungsländern gibt es keine klar definierten Eigentumstitel, und der Staat ist häufig offizieller Eigentümer. Konflikte um Land haben bisher eher auf lokaler und nationaler Ebene stattgefunden, ohne die Aufmerksamkeit der Weltöffentlichkeit, werden aber zunehmend internationaler. Wenn derartige Konflikte nun vermehrt auch von Bodenaneignungen ausgelöst werden, kann die daraus resultierende politische Unsicherheit in den ländlichen Gebieten der Entwicklungsländer auch solide und nützliche Agrarinvestitionen hemmen.

Dieser wachsende grenzübergreifende Erwerb von Land- und Wasserressourcen durch finanzstarke Staaten erfordert international koordinierte Politikmaßnahmen, um sicherzustellen, dass diese Investitionen umweltgerecht, nachhaltig und nicht ausbeuterisch sind. Ein geeigneter Verhaltenskodex für die Regierungen und die ausländischen Investoren, die Land in Entwicklungsländern erwerben wollen, ist erarbeitet, aber noch nicht in die Praxis umgesetzt worden (VON BRAUN 2010).

Landwirtschaftlich nutzbares Land ist nur wertvoll, wenn es Zugang zu Wasser hat, sei es über Regenfeldbau, Grundwasser oder Oberflächenbewässerung. In vielen Ländern werden die vorhandenen Wasservorkommen fast vollständig genutzt oder schon übernutzt, sodass der Grundwasserspiegel sinkt. Dennoch wird die landwirtschaftliche Nachfrage nach Wasser in Zukunft weiter ansteigen. Wasser wird immer knapper werden, nicht weil es grundsätzlich zu wenig Wasser zur Bewässerung gibt, sondern vor allem weil diese Ressource schlecht bewirtschaftet wird und Regelungen zur effizienten Wassernutzung, die auch einen Preis haben muss, politisch blockiert werden. Wasser wird verschwendet, und die Landwirtschaft ist daran maßgeblich beteiligt, denn weltweit werden ca. 70 % des Frischwassers von der Landwirtschaft genutzt. Heute verbrauchen wir 4500 km³ Wasser.

Wenn wir so weiter wirtschaften wie heute, würden 2030 jedoch 6900 km³ Wasser erforderlich sein. Anpassung auf der Nachfrageseite ist also unumgänglich. Wenn auch das Bild regional differenziert ist, so steigen die Kosten pro zusätzlichem Kubikmeter Wasserangebot generell steil an. Länder mit ausreichenden finanziellen Ressourcen können ihre Wasserknappheit kompensieren, wenn sie Nahrungsmittel, die viel Wasser für ihre Herstellung erfordern, importieren. Solch ein „virtueller Wasserhandel“ ist Teil eines effizienten Systems der Wassernachfrage. Allerdings muss der Wasserfußabdruck eines Landes berücksichtigt werden, ob das genutzte Wasser von Standorten abgezogen wird, wo Wasser knapp ist, sonst bleibt er aussageelos.

Eine solche neue Analyse haben LENZEN et al. (2012) vorgelegt (Tab. 3). Sie ergibt, dass Indien, China und die USA den größten Wasserfußabdruck hinterlassen, aber Deutschland reiht sich ebenfalls unter die Top 10 der Länder ein. Bei dieser Betrachtung wird deutlich, dass Wasserknappheit ein globales Thema sein muss, denn das knappe Gut „Wasser“ wird implizit gehandelt. Auch Länder mit scheinbar großer Wasserverfügbarkeit sind an der Verknappung über ihre Kaufkraft indirekt beteiligt, z. B. Deutschland und die USA.

Übergeordnet zu dem oft postulierten verbesserten technischen Wasser-Management erfordert dies eine neue „Wasser-Ordnungspolitik“. Ordnungspolitik etabliert klare Prinzipien für effizientes Funktionieren wirtschaftlicher Systeme (wie z. B. in einer sozialen Marktwirtschaft). Dies beinhaltet das Setzen gesellschaftlicher Ziele, die nicht nur technisch-wissenschaftlich sind, sondern auch Präferenzen-abhängig und sodann die Verfolgung dieser Ziele mit höchster (Ressourcen-)Effizienz. Dabei ist bei der Wasser-Ordnungspolitik zwischen Trinkwasserzielen, Bewässerungswasser und Wasser für ökologische Zwecke zu unterscheiden. Ordnungspolitik erstreckt sich dann auf den Rahmen, mit dem Wasserressourcen zwischen Nutzungskonkurrenzen geteilt werden, die Bewertung des Wassers (auch in Preissystemen) und die *Governance*-Strukturen, die Ordnungspolitik legitim etablieren und umsetzen (z. B. auf unterschiedlichen zentralen und dezentralen Ebenen).

Tab. 3 Wasserfußabdruck insgesamt und unter Berücksichtigung der Herkunft des Wassers von knappen Standorten (Quelle: LENZEN et al. 2012)

Top 10-Länder nach ihrem Wasserfußabdruck		Top 10-Länder nach ihrem Wasserfußabdruck von knappen Standorten	
Land	Wasserfußabdruck, in Tera l	Land	Wasserfußabdruck in Tera l
USA	915	Indien	265
China	875	China	165
Indien	858	USA	151
Brasilien	381	Pakistan	81
Russland	303	Iran	58
Japan	262	Ägypten	49
Indonesien	243	Deutschland	49
Deutschland	234	Japan	46
Frankreich	180	Italien	34
Nigeria	175	Frankreich	34

4. Mittel- und kurzfristige Perspektiven der Welternährung

Kurz- und mittelfristige Ernährungsprobleme resultieren aus vermehrter Armut, akutem Beschäftigungsmangel, u. a. ausgelöst durch Wirtschaftskrisen, Wetterbedingungen (z. B. Dürre), saisonaler Nahrungsknappheit und handelspolitischen Reaktionen, wie Exportbeschränkungen. Besonders kurzfristig wirken Schocks, die die Verfügbarkeit an Nahrungsmitteln drastisch einschränken, Zusammenbruch von Kaufkraft, z. B. wegen Preisschocks, aber auch akute kriegerische Konflikte, die Nothilfe nicht zulassen, sowie Naturkatastrophen, wie Überschwemmungen.

Für die ärmsten Entwicklungsländer bedeuten kurzfristig erhöhte Weltmarktpreise vor allem höhere Importkosten. Arme Menschen in den Entwicklungsländern geben oftmals über 70 % ihres Einkommens für Nahrungsmittel aus. Wenn die Preise für Nahrungsmittel steigen, sinkt ihre Kaufkraft. Allerdings variieren die Effekte von Land zu Land, weil die Struktur der Armut unterschiedlich ist. Während Nahrungskonsumenten unter steigenden Preisen leiden, können Produzenten teilweise profitieren. Tatsächlich sind aber bäuerliche Armutshaushalte häufig keine Nettoverkäufer von Grundnahrungsmitteln. Bei vielen Kleinbauernfamilien reichen die Nahrungsmittel, die sie ernten, nicht einmal zur Deckung des eigenen Bedarfs.

Märkte und Welternährung

Die hohen Getreidepreissteigerungen der vergangenen Jahre wurden durch akute Ernteaufschläge in einigen Regionen induziert. Hinzu kam die stark gestiegene Nachfrage nach Getreide und Ölsaaten für die Biotreibstoffnutzung, die bereits oben diskutiert wurde. Es wird geschätzt, dass die erhöhte Getreidenachfrage für Biotreibstoffzwecke für ca. 30 % des beobachteten weltweiten Preisanstiegs zwischen 2006 und 2008 verantwortlich war, bei Mais sogar für fast 40 %. Zudem zeigen Analysen, dass Marktspekulationen in der Krise von 2008 die Agrarpreise zusätzlich in die Höhe getrieben haben und auch die Verknüpfung der Agrarentwicklung mit der Finanzmarktentwicklung zugenommen hat (VON BRAUN und TADESSE 2012). Spekulanten sind nicht ursächlich für Preistrends verantwortlich, aber sie können kurzfristige Entwicklungen und Preisausschläge erheblich verstärken. Kurzfristig verhängte Exportrestriktionen in einigen Ländern hatten auch einen entscheidenden Einfluss (Abb. 3).

Neben dem Preisniveau ist auch die Preisvolatilität – also das kurzfristige Auf und Ab der Preise – für die Ernährungslage von Bedeutung, weil die Hungernden kaum Möglichkeiten haben, sich kurzfristig anzupassen. Preisvolatilität und insbesondere extreme Preisspitzen erhöhen die Unsicherheit über das real verfügbare Einkommen.

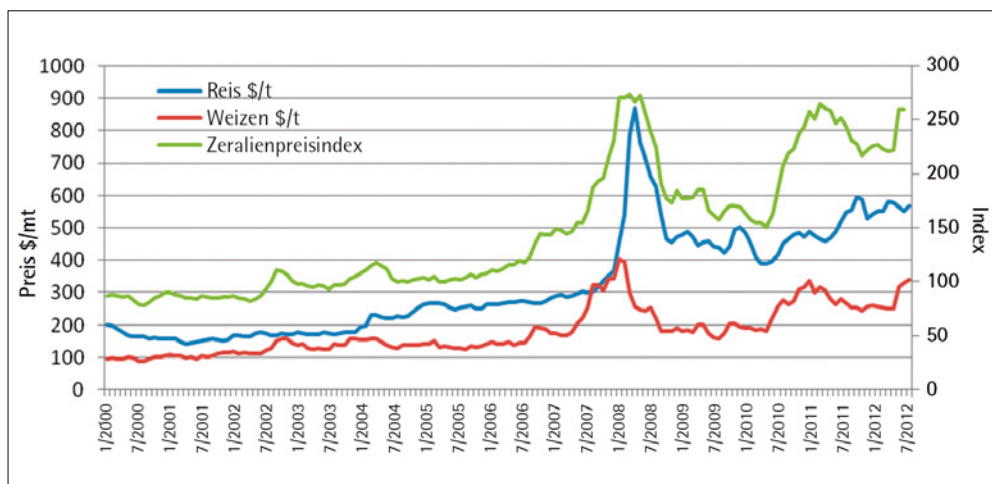


Abb. 3 Preisentwicklungen bei Getreide 2000–2011. Quelle: nach Daten der FAO 2012

Im Kern der Kritik an Nahrungsmittelspekulationen steht daher die Frage, ob der Handel am Finanzmarkt zu übermäßig starken Preisausschlägen bei den „realen“ Spotpreisen führt. Im besonderen Fokus der Politik (national wie auch multilateral bei den G8/G20-Treffen) sind dabei auch die Finanzmärkte, die im Verdacht stehen, durch den Handel mit Terminkontrakten und Derivaten zu extremen Preisausschlägen beigetragen zu haben. Der Finanzmarkt inklusive der Zwischenhändler übernimmt aber eine bedeutende Funktion bei der Absicherung von Preisrisiken; der rege Handel mit Kontrakten trägt auch zur Preisfindung bei: Neue Informationen über die Angebots- und Nachfragesituation werden schnellstmöglich eingepreist und stehen damit der Allgemeinheit zur Verfügung. Ein „korrekter“ Preis ist fundamental für das Funktionieren von Märkten, weil er (zukünftiges) Angebot und (zukünftige) Nachfrage in Einklang bringt; er ist damit praktisch ein öffentliches Gut. Über die physische Lieferung der zugrunde liegenden Ware eines Terminkontraktes gleichen sich die Preise für Terminkontrakte den Kassapreisen (auf dem „realen“ Spotmarkt) an. Weil gerade der Finanzmarkt so schnell neue Informationen zu Preisänderungen verarbeitet, beeinflusst er oft den Spotpreis einseitig. Das Volumen der Agrarderivate ist in den letzten Jahren stark gestiegen, und Banken haben vermehrt Produkte angeboten, mit denen Anleger auf Preisanstiege wetten können (Index-Fonds). Einige Banken haben bereits auf den Druck der Öffentlichkeit reagiert und bestimmte Angebote aus ihrem Programm genommen; eine verbesserte Regulierung der Finanzmärkte wird ebenfalls in der EU und den USA sowie anderen G20-Ländern umgesetzt.

Ein Indiz für die enge Verknüpfung von Rohstoffmärkten mit Finanzmärkten stellt der Einfluss der Finanzkrisen dar, welche einen signifikanten Zusammenhang mit der Volatilität aufweist (VON BRAUN und TADESSE 2012): Das erschütterte Vertrauen in klassische Anlagen (Aktien, Staatsanleihen, Immobilien) ist eng verbunden mit Investitionen in Rohstoffe als alternative (sicherere) Anlageform. Ökonometrische Untersuchungen belegen einen kausalen Zusammenhang zwischen der erhöhten Handelsaktivität von Zwischenhändlern (Spekulation) und Preisspitzen, aber nicht zwischen Preistrends. Der Einfluss von Spekulation auf die allgemeine Preisvolatilität ist nicht sehr ausgeprägt und nur bei einzelnen Agrarrohstoffen für kurze Zeiträume beobachtbar. Spekulation ist nach gegenwärtigem Stand der Forschung nicht die entscheidende Kraft hinter dem gestiegenen Preistrend oder der Volatilität, ist aber an den extremen Preisspitzen ursächlich beteiligt, und dies ist für die kurzfristige Welternährungslage ein Problem.

Seit der Nahrungsmittelkrise 2007/2008 ist auf nationaler wie internationaler Ebene intensiv über verschiedene Maßnahmen zur Erhöhung der Ernährungssicherung diskutiert worden. Die letzten G8/G20-Gipfel widmeten sich der Regulierung der Finanzmärkte, der Reduzierung der Volatilität von Rohstoffen, der Erhöhung der Transparenz und Informationen auf Agrarmärkten sowie neuen Investitionskanälen zur Steigerung landwirtschaftlicher Produktivität (HIEMENZ 2012).

5. Welternährungspolitik anpassen

Eine Welternährungspolitik, die sich an die neuen Angebots- und Nachfragesituationen der Welternährungsgleichung anpassen soll, muss sich zum einen der langfristigen, fundamentalen Determinanten annehmen, die zu einer Gleichung auf zu niedrigem und damit riskanten Niveau führen können, zum anderen muss sie die mittel- und kurzfristigen Probleme bewäl-

tigen. Sie steht somit vor dem Dilemma, lang- und kurzfristige Maßnahmen kohärent zu verbinden. Von einem Dilemma kann deshalb gesprochen werden, weil auch kurzfristige Maßnahmen finanzielle Ressourcen beanspruchen, die für langfristige Maßnahmen dann fehlen.

5.1 Langfristige Politik

Wir brauchen eine langfristige Welternährungspolitik, die die strukturellen Ursachen der Ernährungsunsicherheit überwindet. Dazu zählen insbesondere die folgenden Maßnahmen:

- Investitionsförderung für landwirtschaftliche Entwicklung mit Hilfe von Entwicklungsfonds kann ein wirksamer Hebel für private Investitionen in Entwicklungsländern sein, indem sie Risiken absichert. Durch relativ kleine Zuschüsse können große Investitionen zur Stärkung regionaler Wirtschaftskreisläufe und Wertschöpfungsketten ermöglicht werden.
- Investitionen in Forschung und Entwicklung von Technologien, die die Produktivität und Robustheit von Nutzpflanzen steigern, sind der entscheidende Faktor zukünftiger Ernährungssicherung. In erheblichem Maße müssen das öffentliche Forschungsaufwendungen sein, denn der Kleinbauernsektor der Entwicklungsländer bietet dem Privatsektor in wichtigen Bereichen nicht genügend Investitionsanreize. Speziell aufgelegte Fonds mit sogenannte „Pull“-Mechanismen, welche Zahlungen für Innovationen nach klar festgelegten Erfolgskriterien vergeben, können eine Rolle spielen.
- Mangelhafte Infrastruktur (Transportsysteme) verhindert in vielen Entwicklungsländern einen funktionierenden (lokalen) Agrarmarkt. Zudem muss die Lagerhaltung verbessert werden, und allgemein verfügbare Wetter- und Preisinformationssysteme müssen eingerichtet und gefördert werden. Dies ermöglicht Kleinbauern, stärker zu investieren, was sich positiv auf die landwirtschaftliche Produktivität und die regionalen Wirtschaftskreisläufe auswirkt.

5.2 Mittel- und kurzfristige Politik

Wichtige Elemente einer umfassenden Stabilisierungspolitik sind:

- Verbesserung des Risikomanagements: Entwicklungsländer sollten durch internationale Organisationen und Plattformen beim Aufbau wirksamer Risikomanagementstrategien unterstützt werden. Diese umfassen Instrumente, die die Bauern und Regierungen vor schweren Missernten schützen, aber auch nationale Hilfsprogramme für Haushalte mit geringem Einkommen absichern.
- Eine stabilisierende Biokraftstoffpolitik: Die Nachfrage nach Mais und Weizen zur Gewinnung von Ethanol sollte durch zeitlich flexible Einspeisungsquoten, die auf aktuelle Ernteauffälle und Lagerbestände stabilisierend reagieren, der Angebotsituation angepasst werden.
- Die Schaffung globaler Abstimmungsmechanismen, um die Finanzmärkte zu beaufsichtigen, um unerwünschte Ausweicheffekte und inkonsistente nationale Regelungen zu verhindern. Die Regulierungsmaßnahmen der EU sollten mit den USA abgestimmt werden, wobei auch zunehmend wichtige Schwellenländern mit ihren wachsenden Finanzmärkten in den Abstimmungsprozess zu integrieren sind.

Da Regierungen der Entwicklungsländer oftmals finanziell oder administrativ nicht in der Lage sind, angemessen auf globale oder regionale Preisanstiege zu reagieren, sollten spezifische Ernährungsprogramme zielgerichtet ausgeweitet und optimiert werden:

- Um eine Optimierung der internationalen Transferprogramme für Hunger- und Nahrungsmittelkrisen zu erreichen, sollten Geberländer ihre finanziellen Leistungen zur Ernährungssicherung an die Nahrungsmittelpreientwicklung indexieren, sodass eine Anpassung an aktuelle Notlagen erfolgen kann, die Planungssicherheit gibt.
- Der Aufbau und die Finanzierung sozialer Sicherungsprogramme in Entwicklungsländern, wie konditionelle Einkommenshilfen für arme Haushalte, sollten verstärkt unterstützt werden. Diese Programme lindern die Konsequenzen kurzfristiger Preisanstiege und stellen eine wichtige Alternative zu den marktverzerrenden *Ad-hoc*-Subventionsmaßnahmen zur Preisstabilisierung dar.
- Die Verbesserung der frühkindlichen Ernährung ist essentiell. Gezielte Ernährungsprogramme, die stabil operieren können, also nicht wegen finanzieller Engpässe immer wieder eingeschränkt werden müssen, sind geboten.
- Die Armen haben ein Recht auf den Zugang zu gesunden und nährstoffreichen Lebensmitteln. Die mangelhafte Versorgung mit mikronährstoffreichen Lebensmitteln betrifft ca. 2 Milliarden Menschen und nimmt in Preiskrisen zu. Gezielte Programme zur Bekämpfung dieses sogenannten „Stillen Hungers“ sind erforderlich und inzwischen in ihrer Wirksamkeit gut getestet, aber vielerorts noch zu klein.

Zusammenfassend sei unterstrichen, dass das Welternährungsproblem von einem Bündel von Faktoren auf der Angebots- und Nachfrageseite der Welternährungsgleichung gelöst werden kann. In allen drei Bereichen, also auf der Angebotsseite, der Nachfrageseite und in der Handelspolitik, sind in wachsendem Maße Krisenpräventionsmaßnahmen für die Zukunft erforderlich. Angesichts der kontextspezifischen Problematik des Hungers ist es allerdings notwendig, dass vor allem nationale Maßnahmen ergriffen werden, die zu einer Verbesserung der Ernährung der vulnerablen Bevölkerung führen.

Literatur

- Bioökonomierat*: Nachhaltige Nutzung von Bioenergie. Empfehlungen des Bioökonomierats 03. Berlin: 2012
- BRAUN, J. VON: Food and Financial Crises: Implications for Agriculture and the Poor. Food Policy Report. Washington (DC): International Food Policy Research Institute 2008
- BRAUN, J. VON: „Land Grabbing“. Ursachen und Konsequenzen internationaler Landakquirierung in Entwicklungsländern. Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik 3/10, 299–307 (2010)
- BRAUN, J. VON, and TADESSE, G.: Global food price volatility and spikes: An overview of costs, causes, and solutions. ZEF-Discussion Papers on Development Policy 161, Center for Development Research (ZEF) (2012)
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations): The State of Food Insecurity in the World. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 2012
- HIEMENZ, U.: The Politics of the Fight Against Food Price Volatility – Where Do We Stand and Where Are We Heading? ZEF Working Paper. Bonn 2012
- LENZEN, M., BHADURI, A., MORAN D., KANEMOTO, K., BEKCHANOV, M., GESCHKE, A., and FORAN, B.: The Role of Scarcity in Global Virtual Water Flows. ZEF-Discussion Papers on Development Policy No. 169. Bonn: Center for Development Research (ZEF) 2012
- Leopoldina*: Bioenergie: Möglichkeiten und Grenzen. Stellungnahme. Halle (Saale): Leopoldina 2012

- MALTHUS, T.: An Essay on the Principles of Population. London: J. Johnson 1798
- MALTHUS, T.: Principles of Economics. London: Murray 1820
- NELSON, G., ROSEGRANT, M., KOO, J., ROBERTS, R., SULZER, T., ZHU, T., RINGLER, C., PALAZZO, A., BATKA, M., MAGALAES M., VALMONTE-SANTOS, R., EWING, M., and LEE, D.: Climate Change – Impact on Agriculture and Costs of Adaptation. Washington (DC): International Food Policy Research Institute (IFPRI) 2010
- QAIM, M.: The economics of genetically modified crops. *Annual Review of Resource Economics* 1, 665–694 (2009)
- SCHULTZ, T.: Transforming Traditional Agriculture. New Haven: Yale University Press 1964
- SEN, A.: Poverty and Famines. An Essay on Entitlement and Deprivation. Oxford: Clarendon Press 1982
- THIRLE, C., LIN, L., and PIESSE, J.: The impact of research-led agricultural productivity growth on poverty reduction in Africa, Asia and Latin America. *World Development* 31, 1959–1975 (2003)
- TUBIELLO, F. N., and FISCHER, G.: Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000–2080. *Technological Forecasting and Social Change* 74, 1030–1056 (2007)
- VIETMEYER, N.: Our Daily Bread, The Essential Norman Borlaug. Lorton: Bracing Books 2011
- Weltbank*: Weltentwicklungsbericht 2008: Agrarwirtschaft für Entwicklung. Washington (DC): Weltbank 2007

Prof. Dr. Joachim VON BRAUN
Zentrum für Entwicklungsforschung (ZEF)
Universität Bonn
Walter-Flex-Straße 3
53113 Bonn
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 228 73 18 00
Fax: +49 228 73 18 69
E-Mail: jvonbraun@uni-bonn.de

Ursachen, Folgen und Möglichkeiten zur Bekämpfung der Weltseuche Nährstoffmangel – *Hidden Hunger*

Hans K. BIESALSKI (Hohenheim)

Mit 5 Abbildungen und 5 Tabellen



Zusammenfassung

Hidden Hunger oder deutsch verborgener Hunger beschreibt den Zustand einer Mangelernährung, die nicht wirklich hungrig macht und auch nicht Zeichen des Hungerns trägt. Verborgener Hunger ist das Fehlen bzw. die Unterversorgung mit lebenswichtigen Nahrungsbestandteilen, wie Vitaminen, Mineralen und Spurenelementen, den sogenannten Mikronährstoffen. Die Unterversorgung äußert sich lange nicht in typischen klinischen Zeichen und wird daher übersehen, obwohl die Folgen gravierend sind. Bei Kindern kommt es zu einer eingeschränkten körperlichen wie geistigen Entwicklung. Die Sterblichkeit ist um ein Vielfaches höher als bei gesund ernährten Kindern. Bei Erwachsenen ist das Immunsystem gestört, und vor allem bei schwangeren Frauen hat der verborgene Hunger (z. B. Eisenmangel) eine erhöhte Sterblichkeit während und kurz nach der Geburt zur Folge. Armut ist die Grundlage und zwingt ganze Familien in ein Hungerkarussell, welches sie kaum aus eigener Kraft verlassen können. Die Ursachen für Armut und damit Mangelernährung sind vielfältig und eng vernetzt. In erster Linie sind es die Lebensmittelpreise, die durch Biotreibstoffe, unfaire Handelsbedingungen und korrupte Regierungen hochgetrieben werden. Spekulationen sorgen für besonders kritische Preisschocks, denen die Armen wehrlos ausgesetzt sind. Strategien zur Bekämpfung des verborgenen Hungers müssen Supplemente für die kurzfristige Intervention einsetzen, um nachhaltig zu wirken, ist aber – neben vielen anderen Maßnahmen – eine Veränderung der Infrastrukturen und Stärkung der Kleinbauern erforderlich.

Abstract

Hidden hunger describes a malnutrition that does not really make hungry. Hidden hunger is an inadequate supply with essential nutrients such as vitamins, minerals and trace elements, so called micronutrients. This kind of malnutrition does not result in typical clinical signs and is therefore overlooked even the consequences are severe. In particular the physical and mental development of children is impaired. Mortality is much higher compared to children who have an adequate nutrition. Adults have an impaired immune system, and pregnant women (e. g. iron deficiency) have a high mortality risk during or just after delivery. Poverty is the basis and captures whole families in a hunger carousel, which they hardly can leave. The reasons for poverty and consequently malnutrition are manifold and cross-linked. First and foremost food prices increase due to biofuel, unfair trade regulations and corrupt governments. Speculations are the driving forces for critical price shocks leaving the poor defenseless. Strategies to combat hidden hunger needs to use supplements for acute intervention but to reach sustainability, beside many other approaches, infrastructure needs to be changed and the small farmers should be strengthened.

1. Einleitung

Der *Hidden Hunger*¹ heißt *Hidden Hunger*, weil er auf Grund einer nicht korrekten Definition des Hungers übersehen wird. Die *Food and Agriculture Organization (FAO)* der Vereinten Nationen verfolgt bis heute den Ansatz, den Welthunger rein quantitativ zu erfassen und zu bekämpfen. Sind pro Kopf eine Mindestzahl an Kalorien verfügbar, so bedeutet dies nach den Statistiken der FAO, dass kein Hunger zu befürchten ist (FAO 2011a). Grundlage dieser Berechnung sind im Wesentlichen die drei Grundnahrungsmittel Reis, Mais und Weizen. Diese enthalten jedoch kaum lebenswichtige Mikronährstoffe. Sie decken aber bis heute bei einem Drittel der Weltbevölkerung etwa 80% des täglichen Kalorienbedarfs. Dies erklärt auch, warum die Sicherung der Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung durch Ertragssteigerungen von Grundnahrungsmitteln erfolgen soll.

Auf dem Papier werden so die verfügbaren Kalorien gesteigert. In der Realität allerdings nimmt die Zahl der Hungernden weiter zu. Und so ist es verständlich, wenn der Beauftragte für Ernährungssicherheit der Vereinten Nationen in seinem Bericht zu den folgenden Schlussfolgerungen kommt: „Die Welt zahlt einen hohen Preis für die Fokussierung auf eine ausschließliche Steigerung der Erträge während der letzten Hälfte des Jahrhunderts. Unterernährung ist weiterhin beträchtlich hoch, da die landwirtschaftlichen Systeme (Agrifood) es nicht geschafft haben, die ländliche Armut zu verringern. / Wie Unterernährung ist auch der Mikronährstoffmangel oder ‚Verborgener Hunger‘ eine Verletzung des Rechtes auf einen Lebensstandard der Kinder, damit diese sich physisch und mental adäquat entwickeln können. Die Staaten haben daher die Pflicht [...], Nahrungssysteme zu etablieren, die den Zugang jedes Einzelnen nicht nur zu Lebensmitteln mit ausreichender Energie sichern, sondern auch eine Lebensmittelvielfalt, die die Versorgung mit allen Mikronährstoffen sicherstellt.“²

Die Ernährung des Menschen wird über den Gehalt an Makronährstoffen (Fett, Eiweiß, Kohlenhydrate) und essentiellen Mikronährstoffen (Vitamine, Minerale, Spurenelemente, einige Aminosäuren) definiert. Makronährstoffe werden auch als energie-, d. h. kalorien-, liefernde Bestandteile der Nahrung bezeichnet, während die essentiellen Mikronährstoffe zwar keine Energie liefern können, aber für viele Stoffwechselprozesse und Funktionen des Organismus essentiell, d. h. unentbehrlich, sind. Während der Organismus die Unterversorgung mit Makronährstoffen sehr effektiv zu verhindern weiß, indem er Hunger signalisiert, gibt es – nach allem was wir wissen – für eine Unterversorgung mit essentiellen Mikronährstoffen kein körpereigenes Alarmsignal.

Energieliefernde Nahrungsaufnahme (gleich welcher Art!) sättigt für einen unterschiedlich langen Zeitraum. Dies ist die eine Seite des Hungers: die Suche nach Nahrung um jeden Preis, egal was es ist, nur essbar muss es sein und das Hungergefühl für eine Weile vertreiben. Die durch Hunger ausgelöste Suche nach Nahrung hat Völkerwanderungen, Revolutionen und Kriege bis in die Gegenwart hinein ausgelöst, und jedes politische Regime wird versuchen, den Hunger seiner Bevölkerung, egal wie, zu stillen. Dabei ist es bis heute scheinbar gleichgültig, ob die angebotene Nahrung neben der Sättigung auch den Bedürfnissen der Bevölkerung entspricht.

1 *Hidden Hunger* oder verborgener Hunger ist ein weltweites Problem. Diesem widmet sich ein kürzlich erschienenen Buch des Autors (BIESALSKI 2012), aus dem Auszüge für den nachfolgenden Text entnommen wurden.

2 UN Report O. DE SCHUTTER, 26. 12. 2011.

Die andere Seite ist der verborgene Hunger, die chronische Mangelernährung, der *Hidden Hunger*, den man nicht spürt und der diejenigen, die daran leiden, zwar am Rande ihrer Existenz überleben lässt, aber dauerhaft schädigt.

Fehlen Mikronährstoffe, so wird dies erst sichtbar, wenn schon ein mehr oder weniger ausgeprägter Mangel vorliegt. Für das Fehlen einiger Mikronährstoffe sind spezifische Mangelzeichen typisch (Vitamin C: Skorbut; Vitamin D: Rachitis; Vitamin A: Nachtblindheit, Xerophthalmie), für viele Mikronährstoffe sind diese jedoch nicht bekannt oder sehr unspezifisch. Bevor es zu den klassischen Mangelerscheinungen kommt, vergeht jedoch eine mehr oder weniger lange Zeit der chronischen Unterversorgung, die sich nicht durch typische Symptome zu erkennen gibt. Diesen Zustand nennt man *Hidden Hunger* oder deutsch *verborgenen Hunger*.

Wenn der *Hidden Hunger* sichtbar wird, so sind das in erster Linie die Fälle, bei denen bereits eine schwere Form des Mikronährstoffdefizites besteht. Diese schweren Mangelformen finden sich zu 90% in Entwicklungsländern. In entwickelten Ländern sollte eher von Unterversorgung gesprochen werden. Wie viele Betroffene unter *Hidden Hunger* leiden und es nicht oder noch nicht wissen, kann nur geschätzt werden (Tab. 1).

Tab. 1 Schätzung der Anzahl von Betroffenen mit Mangel/Unterversorgung für verschiedene Mikronährstoffe

Mangel an/Unterversorgung mit Mikronährstoff	Anzahl der Betroffenen
Eisen	ca. 2 Milliarden
Vitamin A	ca. 200 Millionen
Zink	ca. 1 Milliarde
Jod	ca. 500 Millionen
Selen	ca. 100 Millionen

Der Mangel bzw. die Unterversorgung geht dabei oft mit niedriger Eiweiß- und Energiezufuhr einher. In entwickelten Ländern kann die Energiezufuhr dagegen durchaus über dem Bedarf liegen, und dennoch können Unterversorgungen bestehen. Das betrifft im Wesentlichen Eisen, Jod, Vitamin D, Folsäure und Vitamin B12 (bei Senioren). Typische klinische Symptome werden sich hier nicht finden, jedoch lehren die Beobachtungen aus Entwicklungsländern, dass eine Unterversorgung, besonders dann, wenn sie im Kindesalter vorkommt, einen ungünstigen Einfluss auf das Immunsystem und die Entwicklung haben kann.

2. Hunger und *Hidden Hunger* – Definitionen und Zustandsbeschreibung

Die Gesamtzahl der Hungernden hat sich seit 1969 nicht wirklich verändert. Die auffälligste Veränderung zeigt sich im asiatischen Raum (nicht Südasien), wo die Zahl der Hungernden von ursprünglich fast 500 Mio. auf 200 Mio. bis 2007 zurückgegangen ist. Dagegen ist die Zahl der Hungernden in Afrika, vor allem in Subsahara-Afrika, kontinuierlich bis heute gestiegen. Ursache hierfür ist vor allem die Finanzkrise 2008; die Folgen der Finanzkrise 2011 sind dann im Jahr 2012 sichtbar geworden.

Hungerkatastrophe – das ist der *Terminus technicus* für eine Entwicklung, in der absehbar ist, dass weit weniger als die besagten 1800 kcal/Tag, die es zum Überleben braucht,

zur Verfügung stehen. Um Hungerkatastrophen vorherzusagen und Hilfe frühzeitig planen zu können, bedienen sich die verantwortlichen Organisationen wie die Welternährungsorganisation (FAO, *Food and Agriculture Organization*) oder die Weltgesundheitsorganisation (WHO, *World Health Organization*) verschiedener Verfahren, die in nüchternen Zahlen die Ernährungssituation in verschiedenen Ländern darstellen.

Die FAO (2011a, b) definiert die Zahl der Hungernden bzw. Unterernährten über die pro Kopf verfügbare Energiemenge. Sind im Mittel genug Kalorien für alle Einwohner eines Landes vorhanden, so besteht nach dieser Kalkulation kein Grund zur Sorge. Dies geht allerdings an der Tatsache vorbei, dass eine Mittelwertbildung der verfügbaren Energiemenge pro Kopf kaum berücksichtigt, wie die jeweiligen Randgruppen versorgt sind. Und in den armen Ländern kann die besonders arme Randgruppe bis zu 50% der Bevölkerung ausmachen. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Aussage zur Qualität der Nahrung überhaupt nicht erfolgt. Sind die Menschen mit ausreichend Energie durch Reis, Mais oder Hirse versorgt, so sind sie gemäß FAO nicht mangelernährt. Diese drei Grundnahrungsmittel enthalten jedoch kaum lebenswichtige Mikronährstoffe, decken aber bei einem Drittel der Weltbevölkerung etwa 80% des täglichen Kalorienbedarfs.

Der Global-Hunger-Index, wie er durch das IFPRI (*International Food Policy Research Institute*) entwickelt wurde, erfasst dagegen weitaus besser die sichtbaren Folgen der Mangelernährung, indem einerseits die Zahl der Unterernährten registriert wird, andererseits aber auch die Zahl der betroffenen Kinder unter 5 Jahre und die Zahl der Kinder, die vor dem 5. Lebensjahr verstorben sind.

Der Global-Hunger-Index lässt sich als eine Art Fieberthermometer drohender Hungerkatastrophen einsetzen und zeigt auch gleichzeitig das Ausmaß der bestehenden chronischen Mangelernährung. Je größer die Zahl unterernährter und sterbender Kinder, desto wahrscheinlicher ist es, dass mit abnehmender Menge an verfügbarer Nahrungsenergie (z. B. Missernten, Preissteigerungen, Kriege) die Anzahl der schwer unterernährten und sterbenden Kinder sprunghaft steigen wird. Das heißt aber auch, dass die Kinder in einem Land mit alarmierendem Global-Hunger-Index bereits am Rande ihrer Überlebensmöglichkeit existieren. Dies ist nicht hinnehmbar. Ein derartiges Leben bedeutet für die Kinder schlichtweg, dass sie am Leben nicht teilnehmen können. Sie erhalten keine schulische Bildung, haben eine beschränkte geistige und körperliche Entwicklung und spielen jenseits des 5. Lebensjahres „statistisch“ keine Rolle mehr.

Hinter jedem verhungerten Kind stehen mindestens zehn weitere, deren Hunger oft erst wahrgenommen wird, wenn es zu spät ist. Hunger, also chronische Mangel- bzw. Unterernährung, ist bei diesen Kindern kein vorübergehendes Gefühl, sondern ein Dauerzustand. Das gilt auch für den schmalen Grat zum Verhungern, auf dem sie sich bewegen. Warum, so fragt man sich, wird auf diesen Zustand nicht ständig hingewiesen? Die Erklärung ist einfach: Es handelt sich um einen Dauerzustand, der durch vorübergehende Lebensmittelhilfen nicht behoben werden kann, und die Größenordnung der Betroffenen, eine Milliarde Hungernde, liegt jenseits unserer Vorstellungen.

Es gibt drei unterschiedlichen Phänotypen der Unterernährung:

- niedriges Gewicht im Verhältnis zur Körpergröße (*Wasting*),
- nicht altersentsprechende (zu kleine) Körpergröße (*Stunting*),
- nicht altersentsprechendes (zu niedriges) Körpergewicht (Untergewicht).

Wasting als schwerste Form der Unterernährung bedeutet ein für die Körpergröße zu geringes Gewicht, welches zwei Standardabweichungen unter der 95%-Perzentile liegt. Diese Kinder haben wir vor Augen, wenn es um den Hunger geht, es sind geschätzt etwa 35 Millionen weltweit.

Stunting dagegen muss nicht mit Untergewicht einhergehen, es kann sogar bei übergewichtigen Kindern auftreten. *Stunting* bedeutet, die Kinder sind für ihr Alter zu klein (zwei Standardabweichungen unter der mittleren Körpergröße gleichaltriger Kinder innerhalb der untersuchten Population).

An der Anzahl von Kindern mit *Stunting* lassen sich am besten der Ernährungszustand der Bevölkerung sowie Verbesserungen oder Verschlechterungen dieses Zustandes erfassen. Zwei Aspekte sind dabei von Bedeutung:

- Die Wachstumsverzögerung durch Mangelernährung entwickelt sich während der ersten 1000 Lebenstage (begonnen mit der Konzeption bis Ende des 2. Lebensjahres), erfasst also auch die Ernährung des Kindes während der Schwangerschaft.
- Die Wachstumsverzögerung kann nach dieser Zeit kaum mehr aufgeholt werden.

Nach Angaben der WHO³ ergibt sich für die Mangelernährung bei Kindern folgende Situation:

- 186 Mio. Kinder unter 5 Jahren (30% aller Kinder dieser Altersgruppe) leiden unter *Stunting*.
- 115 Mio. Kinder unter 5 Jahren leiden an *Wasting*.
- 20 Mio. Kinder leiden unter schwerster und lebensbedrohender Mangelernährung.
- 3,9 Mio. Kinder (35% aller Todesfälle) versterben infolge unzureichenden Stillens (auch ungünstig zusammengesetzter Muttermilch durch Mangelernährung der Mutter) sowie durch Mikronährstoffdefizite, insbesondere an Vitamin A, Eisen, Jod und Zink.
- In vielen Ländern ist die Ernährung von Kindern nach der Stillphase (sechs Monate) nicht ausreichend, um die Anforderungen an die Mindestqualität für die Kinder in den ersten beiden Lebensjahren zu erfüllen.

In Afrika haben 40% der Kinder *Stunting*, und zwischen 1990 bis 2010 sind die Zahlen von 44 Mio. auf 60 Mio. angestiegen und werden bis 2020 bei 65 Mio. oder mehr liegen (DE ONIS et al. 2012). *Stunting* aber ist das Erscheinungsbild einer durch frühkindliche Mangelernährung bedingten körperlichen und geistigen Unterentwicklung.

Man stelle sich einmal vor, 40% der heranwachsenden Bevölkerung, die, wenn sie überlebt, für die Entwicklung und Produktivität des Landes verantwortlich sein wird, sind bereits in der Kindheit in ihrer Entwicklung so geschädigt, dass es erhebliche Konsequenzen für ihre spätere körperliche wie intellektuelle Arbeitsleistung hat.

Da vor allem Kinder, die durch Reis, Mais oder andere Getreidesorten genug Eiweiß und Energie aufnehmen können, nicht nur gesättigt wirken, sondern durchaus auch nicht unterernährt aussehen müssen, führte dies seit vielen Jahren zu dem fatalen Trugschluss, dass damit genug getan sei. Diese Ernährungsform ist jedoch, wie im Weiteren erörtert wird, kaum geeignet, die altersentsprechende Entwicklung eines Kindes ausreichend zu gewährleisten.

3 WHO-Expertenmeeting Genf, 16. 3. 2011.

3. Wie kommt es zum *Hidden Hunger*

Die Ursachen des *Hidden Hunger* liegen im einseitigen Nahrungsangebot. Die Ernährung der armen Bevölkerung besteht im Wesentlichen aus Grundnahrungsmitteln, wie Hirse, Reis, Mais, Cassava, die zwar sättigen, aber eben nur wenig essentielle Mikronährstoffe enthalten.

Man muss sich nur die Möglichkeiten zur Zusammenstellung einer ausgewogenen Ernährung in armen und weniger armen Haushalten ansehen, um zu verstehen, dass mit zunehmender Armut die Mangelernährung unausweichlich ist (Abb. 1).

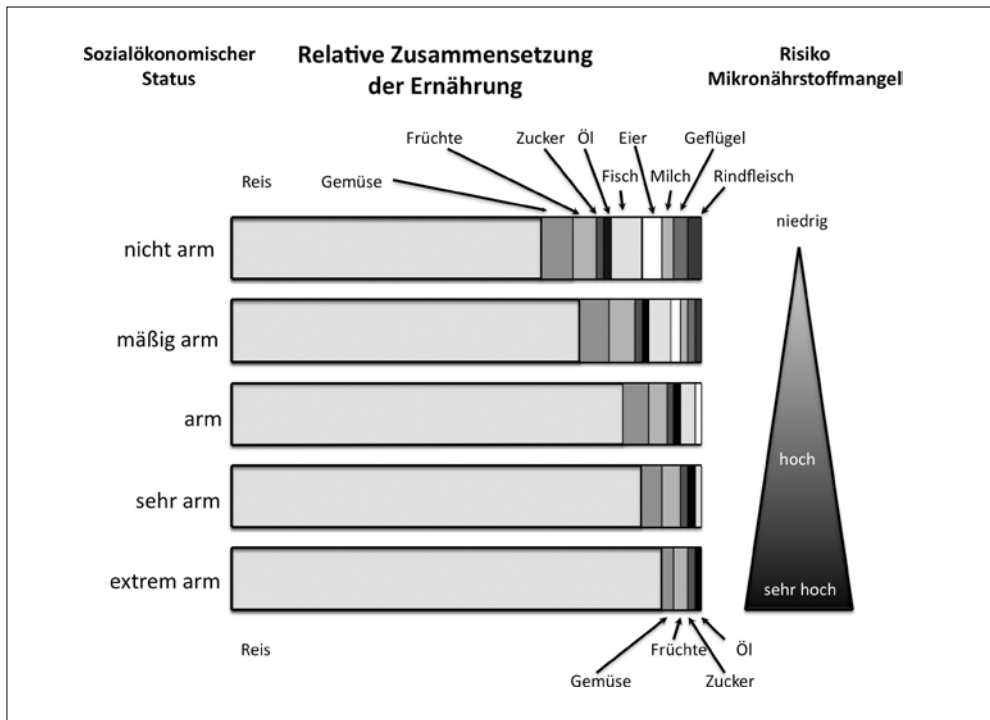


Abb. 1 Die extrem Armen (Einkommen <1,25 US-Dollar/Tag) wie auch die sehr Armen (Einkommen <2,00 US-Dollar/Tag) haben keine Chance, den *Hidden Hunger* zu besiegen. Im ersten Fall besteht die tägliche Kost zu mehr als 90% aus Reis (oder anderen Zerealien), im zweiten Fall sind es 85%. Erst mit steigendem Einkommen, welches dann auch eine größere Menge an Mitteln zum Erwerb von Lebensmitteln einsetzen kann, lässt sich eine halbwegs gesunde Mischkost dauerhaft erreichen. (Modifiziert nach SEMBA 2011.)

Die Daten der Organisation *Save the Children* (2010) zeigen das ganze Dilemma: Selbst bei geringem Einkommen wird die Energieempfehlung erreicht, die Menschen sind oberflächlich satt und doch chronisch unterernährt. Wieder sind es die Kinder, die am meisten darunter zu leiden haben. Fast 80% der täglichen Energie (1651 kcal/Kopf und Tag 2007) kommen im Kongo aus Cassava und Mais, Fleisch macht 1% (16 kcal!) und Öl 7% aus (FAOSTAT 2007). Seit 1992 ist die Energiezufuhr pro Kopf von 2200 kcal/Tag auf 1650 kcal/Kopf und Tag gesunken. In der Konsequenz stirbt jedes vierte Kind vor Erreichen des 5. Lebensjahres.

Ein weiteres Problem stellt die Tatsache dar, dass die Grundnahrungsmittel als Lieferanten von essentiellen Mikronährstoffen nur eine sehr geringe Bedeutung haben, da diese schlecht bioverfügbar sind, d. h. aus diesen Lebensmitteln nicht gut aufgenommen werden können. Im Gegensatz zu Eisen aus Fleisch (60% Bioverfügbarkeit), kann Eisen aus Getreide nur zu 10% aufgenommen werden.

4. *Hidden Hunger* – Folgen der Unterversorgung

Ein Mangel an einzelnen Mikronährstoffen, also eine Ernährung, die diese Mikronährstoffe nicht oder nur in geringen Mengen enthält, hat typische Entwicklungsstörungen zur Folge (Tab. 2). Dabei sind die vier Mikronährstoffe auf den verschiedensten Ebenen vernetzt. Das heißt, es kann nicht mit ausreichender Sicherheit gesagt werden, ob einige der Symptome (Entwicklungsstörungen, Infektanfälligkeit) nur auf einen isolierten Vitamin-A-Mangel oder auf einen kombinierten Mangel an Zink und/oder Eisen bzw. Jod zurückzuführen sind.

Tab. 2 Typische Folgen des Mangels an bestimmten Mikronährstoffen

Mikronährstoff	Konsequenzen des Mangels
Eisen	Störung der mentalen und körperlichen Entwicklung Schwangerschaft: erhöhte Sterblichkeit
Vitamin A	Erblindung, Atemwegsinfekte Schwangerschaft: Entwicklungsstörung, Lungenfunktionsstörung
Zink	Störung der mentalen und körperlichen Entwicklung Durchfallerkrankungen (Steigerung der Defizite)
Jod	Störung der mentalen Entwicklung Schwangerschaft: Entwicklungsstörung, angeborene Taubheit

Je nach Grad und Dauer des Versorgungsdefizits können die oben zitierten verschiedenen Entwicklungsstörungen mehr oder weniger stark ausgeprägt sein. Armut und Mangelernährung sind oft auch mit geringer Bildung verbunden, deren Grundlage, die eingeschränkte mentale Entwicklung, letztlich durch die Mangelernährung mit verursacht wird.

Wer schon früh ein schwaches Immunsystem hat, wird öfter krank. Masern, aber auch Tuberkulose und Malaria sind häufige Infektionskrankheiten und verlaufen bei Kindern mit *Hidden Hunger* oft besonders schwer und auch tödlich.

Hidden Hunger, als Folge oder auch typisches Merkmal der Mangelernährung, und Infektionskrankheiten haben einen sich gegenseitig verstärkenden Effekt. Das bedeutet, dass bereits eine moderate Mangelernährung (ohne klinisch sichtbare Zeichen) im Falle einer Infektion das Krankheitsbild deutlich verschlechtern kann. Das Immunsystem ist bereits frühzeitig geschwächt und folglich nicht in der Lage, adäquat zu reagieren. PELLETIER und Kollegen (1995) haben in Untersuchungen zur Kindersterblichkeit in 53 Ländern festgestellt, dass der negativ verstärkende Effekt der Mangelernährung auf den Krankheitsverlauf für 56% der Todesfälle verantwortlich gemacht werden kann. Der Grad der Mangelernährung muss dabei nicht sehr ausgeprägt sein. Immerhin sind, bezogen auf die Gesamtheit der Todesfälle (56%), nur 17% mit schwerer Mangelernährung verbunden, 83%

entfallen auf milde Formen, d. h., die Ursache ist der *Hidden Hunger*. Eine abwartende Haltung, etwa bis zum Auftreten klinischer Zeichen der Mangelernährung, spielt mit dem Leben der Kinder (PELLETIER et al. 1995).

Sie spielt aber nicht nur mit dem Leben der Kinder, sondern auch mit deren Zukunft. Je mehr dieser verborgene Hunger im Verborgenen belassen wird, desto geringer sind die Chancen der Betroffenen, den verheerenden Kreislauf aus Armut und Mangelernährung zu verlassen (Abb. 2).

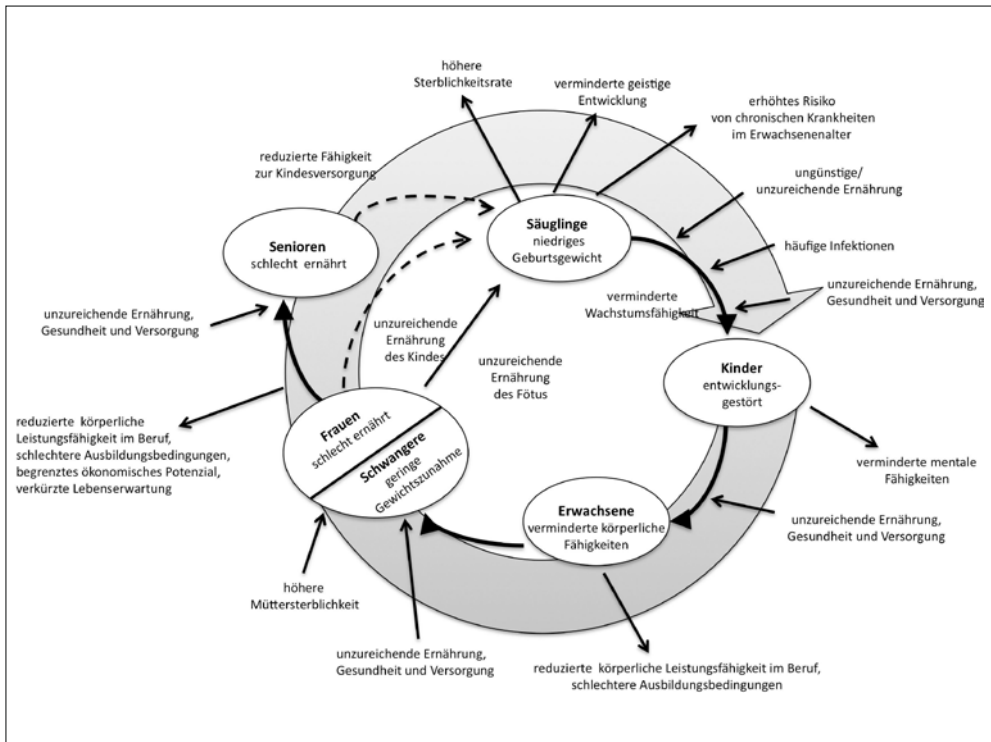


Abb. 2 Der Hungerkreislauf – das Hungerkarussell – zeigt die Personen auf dem Karussell und die treibenden Kräfte (modifiziert nach: *United Nations, Administrative Committee on Coordination/Subcommittee on Nutrition [ACC/SCN] 2000*).

Werfen wir einen Blick auf das gesamte Karussell, so wird diese fatale Vernetzung mit all ihren Konsequenzen deutlich: In knapp drei Jahren (bis 2015) sollte das 1990 erklärte Millennium-Ziel (MDG) 4 erreicht sein. Die Zahl der Kinder, die vor dem 6. Lebensjahr sterben, sollte um zwei Drittel reduziert sein. Dies entspräche einem jährlichen Rückgang der Sterblichkeit um 4,4%. 1990 lag die Sterblichkeit weltweit bei 12,2 Mio. Kindern unter 5 Jahren, heute liegt sie bei 7,7 Mio. Dies entspricht lediglich einem jährlichen Rückgang von knapp 2% und nicht, wie gewünscht, 4,4%. Die derzeitige Entwicklung (Globalisierungsfolgen, Preise, Klima, Handelsbeschränkungen, Armut usw.) lässt kaum erwarten, dass die Verringerung der Kindersterblichkeit zügig voranschreitet. Ähnlich sieht es bei der dramatisch hohen Müttersterblichkeit aus.

Im Vergleich zur Müttersterblichkeit in Europa, die zwischen 3 und 10/100 000 liegt und der Sterblichkeit der Kinder unter 5 Jahren, zwischen 2 und 6/1000, wird die Dimension deutlich. Die Wahrscheinlichkeit einer Mutter aus Subsahara-Afrika, die Geburt ihres Kindes nicht zu überleben, ist bis zu 120-mal größer als die einer europäischen Mutter, und daran hat sich seit fast 20 Jahren nicht wirklich viel verändert. Anders ausgedrückt: Das Risiko einer Mutter in Europa, unter der Geburt zu versterben, liegt bei 1/2800, in Afrika bei 1/20 (!) (ABOU-ZAHR 2003).

- Jahr für Jahr gebären 60 Mio. Frauen ihre Kinder zu Hause ohne jede fachliche Hilfe. Das sind etwas mehr als ein Drittel aller Geburten.
- Jedes Jahr sterben zwischen 400 000 und 600 000 Frauen (je nach Quelle) während der Geburt, etwa 10% zusätzlich infolge unsachlich ausgeführter Abtreibungen.
- Jahr für Jahr sterben 4 Mio. Neugeborene innerhalb der ersten 28 Lebenstage.
- 3 Mio. werden tot geboren.
- 10 Mio. Kinder sterben vor Erreichen des 5. Lebensjahres.
- Jede Minute sterben 20 Kinder unter 5 Jahren, sieben Neugeborene und eine Mutter.

Mehr als die Hälfte der Todesfälle könnten durch eine auch nur halbwegs ausreichende Ernährung der Mütter und Kinder vermieden werden.

Die hohe Kinder- und Müttersterblichkeit steht in direktem Bezug zur minderen Lebensmittelqualität, d.h. dem *Hidden Hunger*. Durch die Unterversorgung mit Vitamin A, Eisen und Zink wird die gesamte Abwehrkraft geschwächt. Das Immunsystem leidet ebenso, wie die für die Abwehr wichtigen Schleimhautbarrieren der Atemwege und des Darmtraktes. Die Folge sind häufige Infektionskrankheiten, die zu einer weiteren Schwächung beitragen.

Atemwegserkrankungen (sowohl viral als auch bakteriell) zählen bei Kindern mit Mangelernährung zu den häufigsten schwerwiegenden Erkrankungen, die auch mit einer hohen Sterblichkeit verbunden sind. Etwa 2 Mio. Kinder sterben jährlich an Atemwegserkrankungen.

Die WHO hat kürzlich eine Vitamin-A-Substituierung bei Kindern zwischen 6 und 59 Monaten empfohlen, um, wie dies aus einer Vielzahl von Studien evident war, die Sterblichkeit und Erkrankungsrate bei diesen Kindern zu senken. In einer Metaanalyse wurde als Ergebnis aus 21 Studien festgestellt, dass eine frühzeitige Vitamin-A-Substitution bei Kindern ab dem 6. Lebensmonat zu einer deutlichen Reduzierung (12%) der Sterblichkeit beiträgt. Dies galt insbesondere für Todesfälle infolge von Durchfällen, Mäse, aber auch Pneumonie (IMDAD et al. 2011).

Eine Metaanalyse aus jüngerer Zeit (MAYO-WILSON 2011) bestätigt die oben zitierten Ergebnisse nach Auswertung von 43 Studien mit 215 633 Kindern. In 17 Studien sank die Sterblichkeit der Kinder um 24%, in sieben Studien die Sterblichkeit infolge von Durchfällen. Die Supplementierung führte zu einer Senkung der Durchfallerkrankungen (15%) sowie der Maserninfektionen (50%).

Da der Vitamin-A-Mangel erst sehr spät nachweisbar ist, jedoch lange vorher schon die Infektanfälligkeit der Kinder steigt, geht man bei der Beurteilung der Versorgung mit diesem Vitamin von der Wahrscheinlichkeit einer Unterversorgung aus (VAMR, Vitamin-A-Mangel-Risiko), basierend auf den Daten von 1995 für Afrika (AGUAYO 2005; Tab. 3).

Tab. 3 Vitamin-A-Mangel-Risiko (VAMR) in Afrika (AGUAYO und BAKER 2005)

Region	VAMR %	Anzahl Mio.	Todesfälle durch VAM	% Todesfälle durch VAM
West- und Zentralafrika	40,2	20,8	315 960	23,5
Ost- und Südafrika	44,8	22,4	330 295	26,9
Subsahara-Afrika	42,4	43,2	646 255	52,1

Die Zahlen zum Vitamin-A-Mangel-Risiko verdeutlichen nochmals die Dimension des *Hidden Hunger*. Wenn bis zu 50% der Bevölkerung dieses Risiko tragen, so hat dies eine erhebliche gesundheitliche Bedeutung. Einerseits durch die mittel- bis langfristigen Folgen und das erhöhte Erkrankungsrisiko durch das Fehlen des Vitamins, andererseits steht dieses Risiko als Indikator für fehlende Quellen (tierische Lebensmittel, Provitamin A reiche pflanzliche Quellen). Dies bedeutet aber auch, dass weitere Mikronährstoffe fehlen und das Vitamin-A-Mangel-Risiko eine generelle Mangelernährung signalisiert, die weitere Mikronährstoffe, wie Eisen, Zink, Selen, aber auch essentielle Aminosäuren betrifft.

5. Eisen

Ähnlich wie die Nachtblindheit bei Vitamin-A-Mangel ist eine durch Eisenmangel hervorgerufene Anämie als klinisches Zeichen ein Endzustand der Entwicklung, denn bevor sie nachweisbar ist, sind die Eisenspeicher geleert (Stadium 1), und es kommt zu einem Eisenmangel zunächst ohne Anämie (Stadium 2), ehe sich die Anämie dann analytisch erfassen lässt (Stadium 3). Gerade in der Schwangerschaft wird durch die zunehmende Blutmenge und den Bedarf des Fetus vermehrt Eisen gebraucht. In den USA, so Ergebnisse einer landesweiten Studie, liegt die Eisenaufnahme von fast 90% der Schwangeren deutlich unter dem ermittelten mittleren Bedarf (14,7 mg/Tag statt der erforderlichen 22 mg). In Deutschland, so die nationale Verzehrstudie, erreichen junge Frauen (60%) im gebärfähigen Alter gerade einmal die Empfehlungen für Nichtschwangere. Wird im Falle einer Schwangerschaft die Ernährung nicht entsprechend angepasst, so droht eine deutliche Unterversorgung.

Eine Anämie ist, ob mit oder ohne Eisen, so gut wie immer auch ein Zeichen für eine unausgewogene Ernährung. Zink- und Kupfermangel bzw. Mangel an anderen Mikronährstoffen verstärken bereits eine leichte Eisenmangelanämie und machen darüber hinaus die Betroffenen noch infektanfälliger (SCOTT 2007).

Sinkt die Eisenzufuhr, so werden zunächst die Speicher geleert, dann vermindert sich die Bildung der roten Blutkörperchen, und erst sehr viel später kommt es auch zu einer Einschränkung der Funktion der weiteren eisenabhängigen Stoffwechselfvorgänge. Weltweit sind 1–2 Mrd. Menschen von einer nachweisbaren Eisenmangelanämie betroffen. Weit mehr Menschen leiden an einem sogenannten subklinischen Eisenmangel (ACC/SCN 2000). Das heißt, dass sich zunächst einmal keine Zeichen einer Anämie im Blut erkennen lassen, aber sehr wohl ein hohes Risiko besteht, diese zu entwickeln, sobald die Eisenzufuhr weiter zurückgeht oder aber durch Erkrankungen oder Blutverluste (Regelblutungen) ein akuter Verlust eintritt. Besonders Kinder sind oft von einer Eisenmangelanämie betroffen. Dies ist zwar in entwickelten Ländern seltener, jedoch betrifft es hier vor allem die armen Bevölkerungsgruppen wie auch Kinder aus Familien, die auf eine vorwiegend fleischlose Ernährung setzen.

Der chronische und ausgeprägte Eisenmangel beeinflusst die Entwicklung des Gehirns und des Verhaltens. Je nach Zeitpunkt und Dauer des Eisenmangels können unterschiedliche Hirnregionen in ihrer Entwicklung betroffen sein. Untersuchungen zur Entwicklung von Kindern mit Eisenmangelanämie haben ergeben, dass diese in ihrer intellektuellen Entwicklung hinter den Kindern zurückbleiben, die keine Eisenmangelanämie aufweisen (AKMAN et al. 2004). In vielen Studien wurden vielfältige Tests unternommen, wobei festgestellt wurde, dass der Eisenmangel in der frühen Kindheit die unterschiedlichsten Fähigkeiten, z. B. Lesen, Schreiben, Assoziieren, Lernen, betrifft, die für die spätere Laufbahn dieser Kinder wichtig sind. Auch das affektive Verhalten, wie Angst und Depression, ist bei diesen Kindern gestört. Besonders bemerkenswert ist dabei die Beobachtung, dass Kinder aus Familien mit niedrigem sozioökonomischem Status, unabhängig vom Bildungsstandard der Mutter, sehr viel stärker von solchen Veränderungen in der späteren Jugend (bis 19. Lebensjahr) betroffen waren als Kinder aus Familien mit höherem Einkommen (LOZOFF und JIMINEZ 2006).

6. Zink

Da Zink in eine Vielzahl von Stoffwechselfvorgängen eingebunden ist, ist es äußerst schwierig, einen beginnenden Zinkmangel aufgrund typischer Symptome zu erfassen (Tab. 4). Im frühen Zinkmangel, also bereits in einem Stadium der symptomfreien Unterversorgung, kommt es zu Einschränkungen in der Immunantwort, die für die Abwehr von eindringenden Keimen wichtig ist. Da Zinkmangel häufig mit dem Vitamin-A-Mangel assoziiert ist, führt dies zu einer weiteren Schwächung der immunologisch bedeutsamen Schleimhautbarriere, nicht nur der oberen Atemwege, sondern auch in den Schleimhäuten des gesamten Gastrointestinaltraktes.

Tab. 4 Klinische Symptome bei ausgeprägtem Zinkmangel

Symptome	Risikogruppen
Wachstumsverlangsamung (<i>Stunting</i>)	Schwangere, Stillende
späte Pubertät	Menschen mit veganer Ernährung
Durchfall	Menschen mit Verdauungsstörungen
Haarausfall	(z. B. in Folge parasitärer Erkrankungen)
entzündete Mundschleimhaut	
Veränderung der Nägel	
eingeschränktes Immunsystem	

Zinkmangel als Folge einer unzureichenden Ernährung trägt zu einem wesentlichen Teil zur weltweiten Krankheitshäufigkeit bei und ist direkt für den Tod von 2 Mio. Menschen pro Jahr verantwortlich (WHO 2002). Global wird die Prävalenz des Zinkmangels bei Kindern unter 5 Jahren auf 31 % geschätzt. In Südasien geht man von fast 80 % aus (IZiNCG 2006).

Die Folgen des Zinkmangels äußern sich bei Kindern in schwer beherrschbaren Durchfällen, Lungenentzündungen und der häufigeren Infektion an Malaria. Bereits der moderate Zinkmangel begünstigt Infektionskrankheiten, insbesondere des Darms. Die damit ein-

hergehenden Durchfälle führen zu Störungen der Aufnahme vieler Mikronährstoffe, die dann den Zustand der Kinder weiter verschlechtern. So ist die Sterblichkeit bei Kindern mit Zinkmangel gegenüber normal versorgten Kindern um 20% bei Durchfallerkrankungen, 25% bei Pneumonie und um 60% bei Malaria erhöht (BLACK et al. 2008). Die Durchfallerkrankungen töten mehr Kinder als Malaria, Tuberkulose und die HIV-Erkrankung⁴ zusammen. Insgesamt wird mit 1,9 Mio. Todesfällen pro Jahr gerechnet. Dabei wären die meisten Todesfälle vermeidbar gewesen, wenn eine ausreichende Zinkzufuhr für eine adäquate Immunabwehr gesorgt hätte. Verschiedene klinische Studien haben gezeigt, dass die Supplementierung die Intensität und Dauer von akuten Durchfallerkrankungen zu 25–30% sowie auch die Inzidenz und den Schweregrad von akuten Infekten der Atemwege um bis zu 45% senken kann (SHANKAR und PRASAD 1998). Interessant ist auch die Beobachtung, dass Zinksupplementierung zu einer Verringerung (bis zu 35%) der Malaria beitragen kann.

7. Was geht uns das an?

Inwieweit gibt es den verborgenen Hunger auch in Industrienationen, hat dieser dort vergleichbare Folgen – und wenn ja, was wird dagegen getan? Armut ist in unseren westlichen Zivilisationen kein neues Thema. Die Zahl der Armen, besonders der armen Kinder steigt und wird in nationalen Armutsberichten in ähnlich sachlicher Weise erfasst, wie die Hungernden der Welt durch die internationalen Organisationen. In den reichen Ländern können sich Politik und Gesellschaft kaum vorstellen, dass bei dem Überangebot an Lebensmitteln so etwas wie verborgener Hunger existieren und gar Folgen haben könnte.

In Deutschland lebten 2005 17% der Männer und 21% der Frauen unter der Armutsgrenze. Sie verdienten also weniger als 940 Euro im Monat. Die Finanzkrise hat das Problem weiter verschärft: Im Dezember 2012 offenbarte der Schattenbericht der Nationalen Armutskonferenz (*nak*), dass deutschlandweit bis zu 16 Millionen Menschen in Armut leben. Es ist nicht näher bekannt, inwieweit diese Menschen ausreichend ernährt sind, weil entsprechende Studien bis heute fehlen. Rund 30 Millionen Kinder, so die UNICEF-Vergleichsstudie⁵ wachsen in den 35 reichsten Staaten der Welt in relativer Armut auf, 1,2 Millionen davon leben in Deutschland. In Deutschland erhält eines von 20 Kindern keine warme Mahlzeit täglich.

Ernährungssicherheit, so die Welternährungsorganisation FAO, als Voraussetzung für eine gesunde und für die körperliche Entwicklung notwendige Ernährung ist dann gegeben, wenn die Menschen dauerhaft Zugang zu gesunden und nahrhaften Lebensmitteln haben. Es steht aber fest: Der Hartz-IV-Satz reicht für die gesunde Ernährung von Kindern nicht aus. Je nach Alter kostet eine kindgerechte Ernährung mit allen erforderlichen Nährstoffen zwischen drei und sechs Euro pro Tag und Kind. Aber selbst der Hartz-IV-Höchstsatz sieht für die Ernährung täglich nur zwischen zwei und drei Euro in der Altersgruppe der unter 14-Jährigen vor (ALEXY und KERSTING 2012). Die selbe Arbeitsgruppe stellt in einer jüngst veröffentlichten Studie zu den Lebensmittelkosten bei Hartz-IV-Empfängern fest: „Eine empfehlungsgerechte Präventionsernährung gemäß der OMK (optimierte Mischkost) für Kinder und Jugendliche ist mit dem derzeitigen Regelsatz des ALG II nur

4 HIV – Humanes Immundefizienz-Virus.

5 UNICEF – *United Nations Children's Fund*.

bei erheblicher Einschränkung der Lebensmittelauswahl finanzierbar.“⁶ Damit ist aber die Ernährungssicherheit der Kinder gefährdet. Mangelnde Ernährungssicherheit (ausgewogene Kost) ist aber eine der Grundursachen des verborgenen Hungers.

Weil gesunde Nahrungsmittel mit ausreichend lebenswichtigen Nährstoffen ihren Preis haben, sind Arme oft gezwungen, billigere und oft energiereiche (fette) Lebensmittel zu erwerben, die einen geringeren Gehalt an eben diesen Nährstoffen aufweisen. Wer nicht genug Geld für eine ausgewogene Ernährung hat, leidet als Erwachsener häufiger an klassischen Zivilisationskrankheiten wie Fettsucht, Diabetes und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. So verwundert es auch nicht, dass eine soeben veröffentlichte große Studie aus den USA deutlich mehr übergewichtige Kinder im Alter zwischen 2–5 Jahren in unteren Einkommensschichten findet als im Mittel der Altersgruppe aller Kinder in den USA (METALLINOS-KATSARAS et al. 2012). Ursache, so die Forscher, ist die fehlende Ernährungssicherheit in den armen Familien. Entsprechende Untersuchungen aus Deutschland liegen nicht vor, obwohl in der Vergangenheit auch in Deutschland gezeigt wurde, dass in der armen Bevölkerung deutlich häufiger Übergewicht bei Kindern auftritt. In 14% aller Haushalte der USA, so das US-Landwirtschaftsministerium, ist die Ernährungssicherheit nicht gegeben, in armen Haushalten mit Kindern unter 6 Jahren sind es 41%, bei denen die Kriterien der Ernährungssicherheit nicht erfüllt sind (COLEMAN-JENSEN et al. 2011a, b).

Dabei ist die Ernährungsunsicherheit oder genauer der *Hidden Hunger* unabhängig von der Gesamtenergiezufuhr. Das erschwert seine Diagnose oder auch Wahrnehmung durch die Verantwortlichen noch weiter. Betroffen sind Mütter und ihre Kinder mit allen Folgen für ihr Leben. Die an *Hidden Hunger* Leidenden haben oft ein schwaches Immunsystem, werden folglich schneller krank, und sie zeigen eine verzögerte körperliche wie geistige Entwicklung und letztlich auch eine kürzere Lebenserwartung.

Auch in Deutschland wird von Kindern, die in Armut leben, über häufigere Erkrankungen sowie häufigere psychische und physische Probleme im Vergleich zu Kindern aus sozial besser gestellten Familien berichtet, allerdings wird erstaunlicherweise kein Bezug zur eventuellen Mangelernährung hergestellt (PERNA et al. 2010, DU PREL et al. 2005). Eine Studie, die die Situation in Europa abgebildet hat, kommt zu dem Ergebnis, dass auch hier Körpergröße, Erkrankung und Lebenserwartung in Beziehung stehen (BOZZOLI et al. 2009). Eine deutliche Abweichung in der Körpergröße nach unten ist neben anderen Ursachen, wie schweren Krankheiten während der Wachstumsphasen, auch immer ein Zeichen für frühkindliche Mangelernährung. Die mit einer Mangelernährung einhergehende Unterversorgung mit Mikronährstoffen zeigt sich eben nicht an einem typisch klinischen Bild und wird daher auch nicht registriert. Das Problem „verschwimmt“ auch vor dem Hintergrund der Lebensmittelberge, die uns umgeben! Der Hinweis auf die vielen übergewichtigen Kinder als Zeichen eines Problems in der anderen Richtung greift hier aber nicht. Übergewicht, Armut und Fehl- bzw. Mangelernährung liegen nahe beieinander.

Ein wesentlicher Indikator für die Versäumnisse in den ersten Lebensjahren ist, wie erörtert, die geringere Körperlänge im Vergleich zu gut ernährten Kindern. In einer Untersuchung von 283 050 Kindern im Alter von 6 Jahren im Raum Brandenburg, bei denen Informationen zum Längenwachstum sowie zum soziökonomischen Status vorliegen, kommen der Soziologe Jörg BATEN und der Mediziner Andreas BÖHM zu dem Ergebnis, dass Kinder aus Familien mit geringem Einkommen im Vergleich mit Kindern aus Familien mit

6 ALEXU und KERSTING 2012, S. 14.

besserem sozioökonomischem Status signifikant kleiner sind (BATEN und BÖHM 2011). Die Autoren schlussfolgern, dass das geringere Längenwachstum Folge einer fehlenden Betreuung/Zuwendung der Eltern ist. Leider wird die Frage, inwieweit eine unzureichende Ernährung in den ersten Lebensjahren der Kinder eine Rolle gespielt haben könnte, nicht erörtert, wohl auch deshalb nicht, weil Daten fehlen. Für einen Einfluss der Ernährung spricht aber die Tatsache, dass Kinder aus Familien mit drei und mehr Kindern häufiger betroffen sind. Kinder aus Haushalten mit zwei Kindern waren um 0,5 cm kleiner, Kinder aus Haushalten mit vier und mehr Kindern sogar um 1,8 cm. Kinder aus Haushalten, in denen die Mutter weniger als zehn Jahre die Schule besuchte, waren um 0,8–0,9 cm kleiner als Kinder aus Familien mit höherer Bildung. Dies deckt sich mit Studien aus Großbritannien und den USA, wo gezeigt wurde, dass Kinder aus Familien mit geringem Einkommen und mehreren Geschwistern weitaus häufiger Merkmale der Mangelernährung und *Stunting* aufwiesen (*Hunger in Amerika* 2011).

Welche Bedeutung hier die Ernährung für diese verzögerte physische Entwicklung hat, wird leider ebenso wenig untersucht, wie die kognitive Entwicklung der Kinder. Dies ist ein Dilemma in hochentwickelten Nationen, da hier verständlicherweise eine Mangelernährung bzw. ein *Hidden Hunger* kaum vorstellbar ist. Und doch gibt es Hinweise darauf, dass dies auch bei uns in Deutschland so sein könnte.

Die Verbindung von Armut, Mangelernährung und Krankheiten besteht in jedem Land – je nach Einkommen und Zugang zu Lebensmitteln mit deutlichen Unterschieden. Während die Mutter und folglich das Kind in Entwicklungsländern keine andere Wahl haben, als die billigsten Lebensmittel (Getreide) zu kaufen, um satt zu werden, sollte dies in Ländern wie Deutschland anders aussehen. Doch auch hier müssen Arme zu billigen Lebensmitteln greifen, die allerdings im Gegensatz zu Afrika und Asien nicht Getreide heißen, sondern billiges und daher fettes Fleisch oder Wurst. Was der eine zu wenig an Kalorien hat, hat der andere zu viel – eine Erklärung für die besonders starke Häufigkeit des Übergewichts bei armen Familien. Gemeinsam haben beide Ernährungsformen die geringe Dichte an essentiellen Mikronährstoffen. Während in Entwicklungsländern bis zu 80% des Einkommens für Lebensmittel ausgegeben werden, liegen diese Haushaltsausgaben in Deutschland auch bei der ärmeren Bevölkerung unter 15%. Auch bei uns gilt, zuerst kommt die Beseitigung des Hungers und dann die Diversität. Und hier zeigt sich, dass Lebensmittelqualität eine Frage des Einkommens, d. h. der sozialen Klasse, ist. Unterschiedliche Untersuchungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass preisgünstige Lebensmittel mehr Energie (Fett) und weniger Mikronährstoffe haben als teurere Lebensmittel (DREWNOWSKY und SPECTOR 2004.). Eine Studie des Dortmunder Instituts für Kinderernährung an 494 Kindern im Alter zwischen 4 und 18 Jahren kommt zu dem Ergebnis, dass in der Ernährung dieser Altersgruppe eine inverse Beziehung zwischen Energiedichte und Preis existiert (ALEXY et al. 2012). Die höheren Preise für Obst und Gemüse mit geringerer Energiedichte lassen sich durch Fleisch und Wurst mit hoher Energiedichte, aber geringerem Preis kompensieren. Durch den niedrigen Regelsatz von weniger als 3 Euro/Tag lässt sich eine gesunde Ernährung für ein Kind nicht erreichen (ALEXY und KERSTING 2012, KERSTING und CLAUSEN 2007).

Reicht das Geld für eine ausgewogene Ernährung nicht aus, und dies ist vor allem bei alleinerziehenden Müttern der Fall, so bleibt oft keine andere Wahl. Die Einschränkung der Mittel für die tägliche Ernährung geht dann auf Kosten der Lebensmittelqualität und ist damit auch eine wesentliche Ursache für das dreimal häufiger auftretende Übergewicht bei Kindern aus armen Verhältnissen.

Zu demselben Ergebnis kommt der *Dritte Armuts- und Reichtumsbericht der Bundesregierung* (Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2012): „Bei Kindern und Jugendlichen zeigen sich zusätzlich Entwicklungsdefizite, Unterversorgung mit der Folge gesundheitlicher Probleme und soziale Benachteiligungen, etwa durch mangelnde Integration in der Schule und unter den Gleichaltrigen. Es besteht auch ein Zusammenhang zwischen gesundheitlicher Entwicklung (körperlich und seelisch) und materieller Versorgung. Ernährungs- und Gesundheitsverhalten sind beeinträchtigt: je knapper die sozioökonomischen Ressourcen, desto schlechter ist auch die Ernährung (KAMENSKY et al. 2005). Beeinträchtigt werden auch die kognitive und sprachliche Entwicklung sowie die schulischen Leistungen von Kindern.“⁷

Weiter heißt es: „Nach den Daten des SOEP (socioeconmisches Panel) [repräsentative Wiederholungsbefragung von 12 000 Haushalten seit 1984 jährlich] ist das Armutsrisiko von Kindern, anders als nach der europäischen Statistik, mit einem Unterschied von 8 Prozentpunkten deutlich höher als in der Gesamtbevölkerung. Ihr Armutsrisiko ist danach zwischen 2002 und 2005 mit 4 Prozentpunkten auch stärker angestiegen als in der Gesamtbevölkerung.“⁸

Die Erfahrungen aus Entwicklungsländern zeigen, dass besonders die Ernährung der Kinder bis zum 2. Lebensjahr Einfluss auf körperliche und geistige Entwicklung hat und damit das Schicksal der Kinder für ihr späteres Leben entscheidend beeinflussen kann. Dies gilt, wie Studien aus USA und Großbritannien zeigen, auch für Kinder aus armen Familien in hoch entwickelten Industrienationen (WEINREB et al. 2002). Obgleich bisher bedauerlicherweise nicht untersucht, darf davon ausgegangen werden, dass die Ernährungssituation für Kinder aus armen Familien in Deutschland sich von der in anderen Ländern nicht wesentlich unterscheidet. Folglich besteht für diese Kinder ebenfalls ein Risiko, dass ihre körperliche wie geistige Entwicklung u. a. auch durch unzureichende Ernährung beeinträchtigt ist. Dafür sprechen auch die Untersuchungen an deutschen Kinderkliniken, die bei der Untersuchung von 475 Kindern zwischen 3 und 8 Jahren in 24 % der Fälle eine Mangelernährung diagnostizieren konnten (PAWELLEK et al. 2008). Die Autoren dieser Studie bezeichnen das Ergebnis zu Recht als unannehmbar. Es liegen eine ganze Reihe von Untersuchungen vor, die zeigen, dass Kinder aus armen Familien in Deutschland häufiger krank sind, häufiger unter psychischen Beschwerden leiden und in der physischen wie kognitiven Entwicklung hinterherhinken (DUPREL et al. 2005, PERNA et al. 2010). Die nahe liegende Frage, welche Rolle hierbei eine unzureichende Ernährung spielen könnte, wurde offensichtlich nicht gestellt und bisher auch nicht geprüft.

Armut und Mangelernährung hängen auf fatale Weise zusammen. Wer arm ist, kann sich und seine Kinder oft nicht ausreichend ernähren, wer mangelernährt ist, insbesondere in der frühen Kindheit, hat ein hohes Risiko in der Armut zu verbleiben. Ein wichtiger Schritt zur Vorbeugung der Mangelernährung, eine flächendeckende kostenfreie gesunde Ernährung in Kindertagesstätten anzubieten, wie dies in den skandinavischen Ländern der Fall ist, wurde bisher nicht getan. Allerdings gilt es hier auch zu berücksichtigen, dass nur 15,5 % der Kinder unter 3 Jahren in Kindertagesstätten zu finden sind (Armutsbericht). Gerade in den Kindertagesstätten läge aber eine große Chance, gesunde und ausreichende Ernährung anzubieten und so das soziale Gefälle in Bezug zu den Möglichkeiten einer ausgewogenen Ernährung auszugleichen.

7 Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2012, S. 28.

8 Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2012, S. 21.

8. Was treibt das Hungerkarussell an und wie kann der *Hidden Hunger* bekämpft werden?

Beide Fragen sind miteinander verbunden, und der Kampf gegen den *Hidden Hunger* muss da ansetzen, wo seine wesentlichen Ursachen liegen (Abb. 3). Zentrale Bedeutung für die weite Verbreitung und die Unmöglichkeit für die Betroffenen, aus diesem Kreislauf von Armut und Hunger auszubrechen, hat der Preis der Lebensmittel, der durch verschiedene Ursachen, an denen die Betroffenen nicht beteiligt sind, beeinflusst wird.

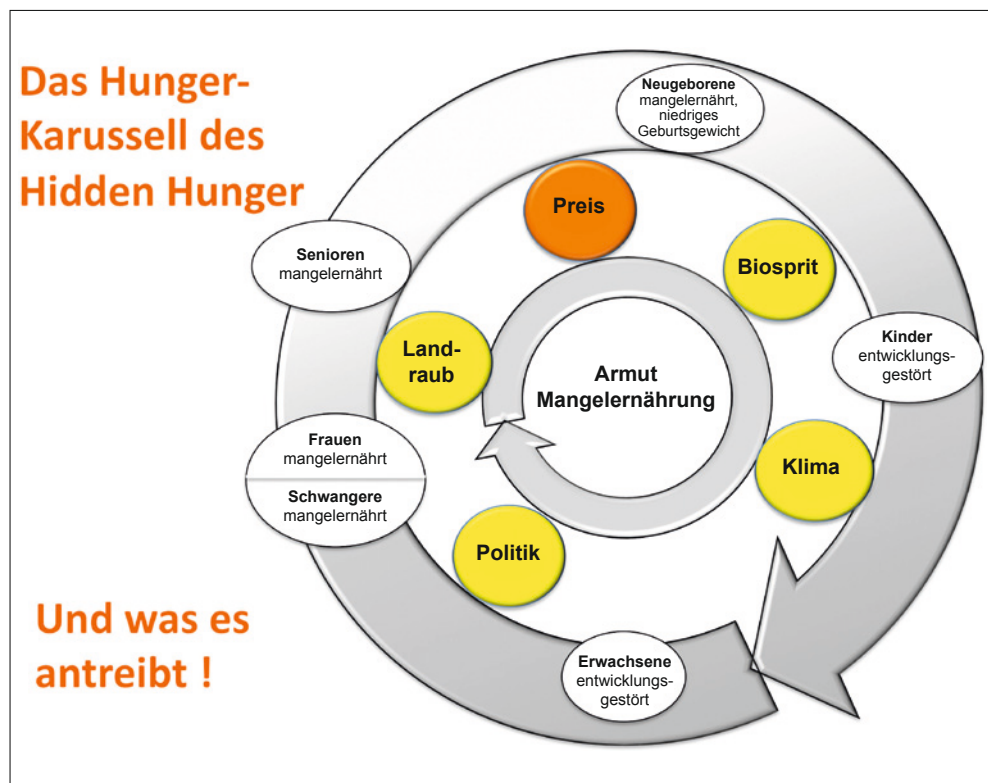


Abb. 3 Die treibenden Kräfte des Hungerkarussells

Jede treibende Kraft für sich hat ihren eigenen Anteil an Armut und Mangelernährung, letztlich jedoch beeinflussen sie den Zugang zu gesunden Lebensmitteln. Schlussendlich sind es jedoch so gut wie immer die Preise, die die Armen in ihre Armut zwingen.

9. Preise

Preisschwankungen bei Getreide spiegeln sich in den Zahlen toter Kinder und Mütter und in den Zahlen entwicklungs-gestörter Kinder wider. Viele der Ursachen für die Preis-

schwankungen wären vermeidbar, und entsprechend faire Regulierungen könnten dazu beitragen, die Preise für die wichtigsten Lebensmittel zu senken und auf niedrigem Niveau zu halten. – Das braucht allerdings mehr als politischen Willen.

Die Preisentwicklung, wie sie durch den *FAO Food Price Index* (FFPI) regelmäßig dokumentiert wird, zeigt zwei wesentliche Aspekte: Die Preise für die wichtigsten Grundnahrungsmittel liegen gegenüber dem Jahr 2000 auf doppelt so hohem Niveau, und die Wirtschaftskrisen 2008 und 2011 haben vorübergehend zu einer erheblichen Zunahme der Preise geführt, die sich danach auch nicht mehr auf das Niveau vor der Krise zurückentwickelt haben (Abb. 4). Es sind weniger die langfristigen Anstiege als vielmehr die kurzfristigen Preisschocks, die sich für die Armen so verheerend auswirken. Wenn wir von solchen Preisschocks betroffen wären, so könnten wir leicht etwas mehr ausgeben. Das heißt, wir könnten die bisherigen Haushaltsmittel für Nahrung, die sich in Deutschland auf ca. 12% belaufen, leicht auf 15 oder sogar 20% steigern und müssten vorübergehend auf manche der anderen liebgewordenen Konsumgüter wie Alkohol, Zigaretten oder Kinobesuche verzichten. Wer aber bereits 80% für Lebensmittel ausgibt, dem bleibt nicht mehr viel, der hat auch nichts mehr zum Einsparen. Preisschocks zwingen die Armen in eine verheerende Spirale, die auch nur schwer aufzuhalten oder gar wieder umzukehren ist. Wenn erst einmal die wenigen Haustiere oder gar das Saatgut verkauft werden mussten, um wenigstens etwas Getreide zum Stillen des Hungers, vor allem der Kinder, zu erwerben, oder gar Mikrokredite bedient werden mussten, dann ist eine Entwicklung, aus der es kein Zurück mehr gibt, schnell erreicht.

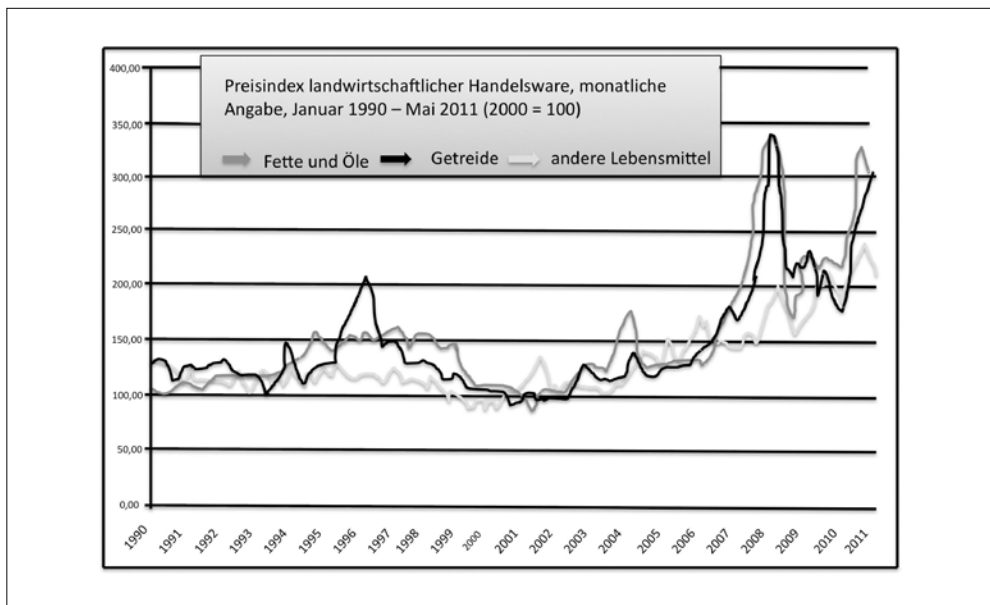


Abb. 4 Preisentwicklungen für landwirtschaftliche Produkte zwischen Januar 1990 und Januar 2011. Bis Ende 2012 sind die Preise nicht mehr wesentlich gesunken. Gerade die Grundnahrungsmittel der Armen, Zerealien und Fett, liegen auf besonders hohem Niveau (*World Bank* 2011, modifiziert).

Wenn die Portion Reis plötzlich das Doppelte kostet, so bleibt den Betroffenen nichts anderes übrig, als entweder zu hungern oder auf minderwertigere und billigere Lebensmittel zurückzugreifen. Je nach Land sind die Reispreise zwischen September 2011 und Dezember 2012 um 25–90% gestiegen, die Weizenpreise um 15–90%, die Maispreise um 10–120% und die Hirsepreise um 20–60% (*World Bank* 2012). Alternativ müssen die Betroffenen auf andere Dinge verzichten, für die ohnedies wenig Mittel zur Verfügung stehen (Abb. 4).

Der Preisschock 2011 hat, so die Organisation *Save the Children* (2011), 500 000 Kindern in Afrika das Leben gekostet, mehr als eine Million dürften zusätzlich in die Mangelernährung gekommen sein. Was helfen dann noch so positive politische Entwicklungen in diesen Ländern, wenn die Generation, die diese Entwicklung später tragen und vorantreiben soll, bereits früh geschädigt wird, in der Armut verbleibt und so wenig Chancen hat, die wirtschaftliche Basis und damit eben auch die Ernährung zu sichern?

10. Gründe für Preissteigerungen

Die Gründe für Preissteigerungen sind vielfältig und bei Weitem nicht nur durch Börsenspekulationen bedingt, wenngleich diese besonders kritisch zu sehen sind. Die FAO (2011a, b) hat folgende Ursachen aufgelistet:

- Trockenperioden in exportstarken Ländern;
- politische Förderung (z. B. Subventionen) der Biotreibstoffe, mit dem Ergebnis einer verstärkten Nachfrage nach Mais und Pflanzenölen;
- Währungsprobleme (Dollarschwäche);
- starkes Wirtschaftswachstum mit der Folge von Preissteigerungen bei Energie und Düngemitteln sowie gesteigerter Nachfrage nach Fleisch (zunehmender Wohlstand) und damit nach Tierfutter;
- als Folge gestiegener Energiepreise höhere Preise für Transport;
- Rückgang der Ertragssteigerungen vor allem bei Reis und Weizen;
- Spekulationen vor allem kurzfristige Erhöhungen – Preisschocks.

Es ist aus unserer gesicherten Perspektive kaum vorstellbar, was es für einen Haushalt, der bereits vor der Krise 2008 70% seiner Mittel in die Ernährung investieren musste, bedeutet, wenn sich die Reispreise plötzlich mehr als verdreifachen und sich auch bis 2011, bezogen auf das Jahresmittel bis 2006, kaum wirklich erholen. Gleiches gilt für die Preise für Fett und Öle. Damit ist der letzte Rest der Existenzgrundlage vieler Armer zerstört. Der jüngste Bericht der Weltbank ergibt für den Zeitraum Februar bis Dezember 2011 eine weitere Preissteigerung für Reis von 12% (*World Bank* 2012b). Für den gleichen Zeitraum lagen die Preise für Weizen, Mais, Hirse und Reis in verschiedenen Ländern (Burkina Faso, Äthiopien, Niger, Uganda, Ruanda, Kenia, Südafrika, Mexiko und Malawi) um 20–120% über denen des ebenfalls schon hochpreisigen Vorjahres.

Die Armen sind gegenüber solchen Entwicklungen wehrlos. Es bleibt ihnen nur abzuwarten, bis entweder die Preise wieder sinken, und sie damit mehr Wahlmöglichkeiten bezüglich des Einkaufs von Lebensmitteln haben, oder aber sie verbleiben in der chronischen Mangelernährung. Im Grunde ist es fast gleichgültig, ob die Preise kurzfristig ansteigen und

dann irgendwann wieder fallen. Für die ohnedies geschwächten Betroffenen bedeutet dies lediglich eine Verlängerung der Mangelernährung bzw. eine noch weitere Reduktion des Lebensmittelangebotes. Selbst wenn kurzfristig die Preise sanken und ein breiteres Lebensmittelangebot zur Verfügung stünde, würde dies nicht bedeuten, dass sich der Ernährungszustand ebenso rasch erholen würde. Krankheiten und vorangegangene Hungerperioden haben vor allem die Kinder so sehr geschwächt, als dass dies kurzfristig zu kompensieren wäre.

11. Folgen der Preisschocks

Preisschocks, also die kurzzeitige drastische Erhöhung der Preise für Grundnahrungsmittel, wie sie z. B. durch Spekulationen ausgelöst werden, stellen eine besondere und akute Gefahr für die arme Bevölkerung dar. Solche Preisschocks führen zu einer Zunahme der Mangelernährung und der Sterblichkeit vor allem bei Kindern unter 5 Jahren. In unserem kulinarischen Wohlstand macht es gar nichts aus, wenn plötzlich die Reis- oder Brotpreise auf das Doppelte steigen, dann weichen wir auf Kartoffeln aus oder verzichten vorübergehend auf Brot. Ganz wie MARIE ANTOINETTE, die sagte, wenn die Armen kein Brot haben, sollen sie doch Kuchen essen. Doch nach Brot kommt eben oft nichts mehr. Bei den Armen, den chronisch Mangelernährten, können schon wenige Tage, in denen sie dann auch die notwendige Energiezufuhr über Lebensmittel nicht mehr erreichen, da sie eben ganz auf Reis oder andere Getreide angewiesen sind, fatale Folgen haben. Ihr Immunsystem ist so geschwächt, dass sie bereits banale Infekte nicht mehr überleben.

Was solche Preissteigerungen (seit Januar 2008 stiegen die Reispreise um 141 %) bedeuten, verdeutlicht Josette SHERAN, die Direktorin des Welternährungsprogramms: Die Mittelklasse spart, indem sie die medizinische Betreuung vermeidet; für diejenigen, die 2 US-Dollar/Tag verdienen (1,5 Milliarden), bedeutet das Verzicht auf Fleisch und für die Kinder Verzicht auf Schule. Für die, die nur 1 US-Dollar/Tag haben (1 Milliarde), kein Fleisch, kein Gemüse, nur noch Getreide, und für die Ärmsten, die von weniger als 50 Cent/Tag leben müssen (0,5–1 Milliarde), ist dies ein totales Desaster. Sie müssen alles verkaufen, was sie noch besitzen, Tiere, Geschirr und das Dach über dem Kopf.⁹

Die Preissteigerungen der vergangenen Jahre haben Hunderte von Millionen Menschen weiter in die Armut getrieben und gleichzeitig den bereits in Armut Lebenden die Möglichkeiten genommen, dieser durch eigene Arbeit entfliehen zu können. Die Folgen der Preissteigerungen der letzten Jahre werden zeitnah sichtbar. So hat sich die Zahl der chronisch mangelernährten und schwer unterernährten Kinder in verschiedenen Ländern verdoppelt (COMPTON et al. 2010). Diese „Last“ wird über Generationen weiter getragen und ist keinesfalls nach Ende der Preisschocks beseitigt. Die Kindersterblichkeit ändert sich über längere Zeit nicht, selbst wenn keine Hungerperioden mehr bestehen. Die chronische Mangelernährung, der verborgene Hunger, ist eine schwere Hypothek, die die Entwicklung ganzer Generationen hemmen kann.

Eine kürzlich veröffentlichte Untersuchung aus Namibia zeigt beispielhaft die verheerenden Folgen eines Preisschocks auf (LEVINE 2012). Zwischen April 2006 und September 2008 nahmen die Preissteigerungen bei Lebensmitteln von 4,9 auf 18,8 % zu. In der gleichen Zeit bewegten sich die Preissteigerungen für Energie und damit auch für den Lebens-

⁹ Nach *Economist* May 08, 2008; S. 26.

mitteltransport von 7,5 auf 18,1%. Bezogen auf Lebensmittel waren die Preise für Öl und Fett um 30%, für Obst und Gemüse um 18%, für Milch, Käse, Eier um 25% und für Brot und Zerealien um 23% gestiegen. Was waren die Folgen? Wie zu erwarten, war besonders die arme Bevölkerung betroffen. Da wesentliche Teile der täglichen Ernährung auch in der Landbevölkerung bar bezahlt werden mussten, gab es keinen Spielraum, und in der Konsequenz nahm die Verschuldung zu. Die gesamte Menge an Lebensmitteln wurde verringert, da auch die Grundnahrungsmittel Öl, Fett und Zerealien deutlich teurer waren. Gleichzeitig mussten die Armen die letzten Besitztümer, die sie noch hatten (landwirtschaftliche Geräte, Transportmittel oder Tiere), verkaufen. Um zu überleben, waren die Armen gezwungen, die Kinder arbeiten zu lassen, anstatt sie zur Schule zu schicken, und auf Gesundheitsvorsorge wurde gänzlich verzichtet. Zwar gilt Namibia als ein Land, in dem zwischen 1990 und 2008 Fortschritte in Bezug auf die Neugeborenen- und Kindersterblichkeit gemacht wurden, Preisschocks machen solche Bemühungen jedoch zunichte. So wird nachvollziehbar, warum die Menschen in ihren Bemühungen, ihren Lebensstandard zu verbessern, resignieren. Der seit 1970 zu beobachtende Rückgang der Kindersterblichkeit stagniert seit 2000, die Müttersterblichkeit hat wieder zugenommen.

12. Biosprit

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina hat 2012 eine Stellungnahme zum Einsatz von Biomasse für die Erzeugung von Energie veröffentlicht. Deutschland, so die Empfehlung, solle den weiteren Ausbau von Bioenergie nicht anstreben. Insbesondere solle das EU-2020-Konzept, welches darauf abzielt, 10% des Treibstoffs für Kraftfahrzeuge aus Biomasse zu gewinnen, überdacht werden.

Einige Zahlen zur Entwicklung von Biosprit (*LMC International* 2010): Seit 1975 hat sich die Produktion von Palm- und Sojaöl von 3 Mio. t/a auf 50 bzw. 40 Mio. t/a gesteigert, gefolgt von Rapsöl (2 Mio. auf 22 Mio. t). Im gleichen Zeitraum ist die Nachfrage im Lebensmittelbereich für alle Öle von 21 Mio. auf 105 Mio. t angestiegen. Im sogenannten *Non-Food*-Bereich lag der Bedarf 1975 unter 1 Mio. t und stieg bis zum Jahr 2000 auf knapp 7 Mio. t an. Erst mit der Entwicklung der Biotreibstoffe vollzog sich hier ein sprunghafter Anstieg, bis zum Jahr 2010 auf fast 40 Mio. t. Parallel nahmen die Flächen für Ölsaaten (nicht jedoch für Getreide) von 530 Mio. ha (1965) auf 650 Mio. ha (2010) zu. Die steigende Nachfrage, vor allem für Treibstoffe, kann folglich in Zukunft nur durch neue Flächen oder aber durch Steigerung der Erträge erfolgen. Letztere sind jedoch offensichtlich bereits an ihre Grenzen gestoßen. Bei Palmöl lag die Steigerung zwischen dem Jahr 2000 (3,8 t/ha) und 2010 (4,6 t/ha) bei 0,8 t/ha. Bei Sojaöl ist nur eine sehr geringe Steigerung festzustellen. Bleibt also nur die Ausweitung der Flächen, was offensichtlich besonders für Palmöl gilt, oder aber die Ausweitung auf andere Ressourcen.

Palmöl wird seit vielen Jahren für die Herstellung von Kosmetik und Schmierstoffen, aber auch als Lebensmittel eingesetzt. Seit der Verwendung von Palmöl zur Herstellung von Biodiesel steigt sein Wert an den internationalen Märkten, und die hergestellte Menge hat sich zwischen 2000 und 2010 mehr als verdoppelt. Die Absatzmärkte für Palmöl, vorwiegend als Biodiesel, das zu fast 80% aus Südostasien, vor allem Indonesien und Malaysia, kommt, sind Europa, Indien und China. Zurzeit sind 4 Mio. ha in Malaysia und 7,5 Mio. ha in Indonesien Palmölplantagen, in die im Wesentlichen durch europäische

Banken investiert wird (COLCHESTER und CHAO 2011). Viele dieser Flächen wurden unrechtmäßig durch Enteignung und Umsiedlung dort lebender Kleinbauern oder durch Entwaldung großer Anteile des natürlichen Regenwaldes erworben. Weniger als 40% der Flächen, so die Analyse der Weltbank (COLCHESTER CHAO 2011), wurden rechtmäßig auf der Basis gesicherter Verträge übernommen.

Es gibt eine Reihe von Gründen, die für die bevorzugte Verwendung von rotem Palmöl, statt Supplementen oder angereicherten Lebensmitteln, sprechen:

- Es handelt sich hierbei um ein traditionelles und akzeptiertes Lebensmittel.
- Im Unterschied zu anderen Provitamin-A-reichen Lebensmitteln (z. B. Karotten, Mango) ist das Provitamin A bereits in Öl gelöst, was seine überlegene Bioverfügbarkeit erklärt.
- Rotes Palmöl ist im Gegensatz zu saisonalen Lebensmitteln wie Mango das ganze Jahr verfügbar.
- Rotes Palmöl enthält nicht nur Provitamin A, sondern auch andere wichtige Mikronährstoffe in teilweise großen Mengen.

Mehrere Studien in Afrika und Asien haben belegt, dass der gezielte Einsatz von Palmöl in der hungernden Bevölkerung nicht nur zu einer deutlichen Linderung des Vitamin-A- und Eisenmangels beitrug, sondern auch Mütter- und Kindersterblichkeit senkte (BIESALSKI 2012). Besonders kritisch ist die Situation für die Hungernden, wenn qualitativ hochwertige Lebensmittel zu Spirit verarbeitet werden, wie dies z. B. bei Palmöl der Fall ist. Dieses dient vielen Menschen als wesentliche Quelle für das Provitamin A und Vitamin E. Neben 50% gesättigten Fetten finden sich auch 50% ungesättigte, die eine positive Bedeutung für die menschliche Gesundheit haben. Im Gegensatz zu Getreide, bei dem man zwischen verschiedenen Angeboten wie Reis, Mais oder Weizen wechseln kann, ist Palmöl unersetzbar. In Indonesien, wo Palmöl vor allem bei der armen Bevölkerung ein Grundnahrungsmittel und eine wichtige Energiequelle ist, stiegen in den vergangenen Jahren die Palmölpreise als Folge der Biodieselproduktion um 50%. Da sich die Armen dieses Öl nun nicht mehr leisten konnten, wurde es im Rahmen eines breit angelegten Programmes durch Sojaöl ersetzt, ein Öl, das in Bezug auf Mikronährstoffe für die Menschen wertlos ist.

Wenn es gelingt, das Wissen um die Bedeutung dieses Lebensmittels bei der Bevölkerung zu verbessern und auch lokale Ressentiments abzubauen, wäre ein wichtiger Schritt in der Bekämpfung des Vitamin-A-Mangels getan. Dennoch wird wegen der hohen Gehalte an gesättigten Fetten mit dem Argument gewarnt, es würde zu einer Erhöhung des LDL-Cholesterins führen – ein eher fadenscheiniges Argument.

2008 konstatiert Oxfam¹⁰: Bleibt der Run auf die Biotreibstoffe erhalten, d. h. setzt er sich so fort wie bisher, so könnte das bis 2025 bedeuten, dass die Zahl der Hungernden um 600 Mio. ansteigt – 16 Mio. je Prozentpunkt Preisanstieg. Die Zunahme der Hungernden im Jahr 2011 und die gleichzeitigen Preisanstiege bestätigen diese Annahme.

Nach Schätzungen des *International Monetary Funds* (IMF) trägt Biotreibstoff zu 35% zu den Preiserhöhungen bei, die Weltbank geht sogar von 65% aus (Oxfam 2008). Die *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OECD 2009) hat geschätzt, dass zwischen 2005 und 2007 60% des weltweiten Anstiegs der Zerealienachfrage auf

10 OXFAM – unabhängige Hilfs- und Entwicklungsorganisation.

das Konto der Biotreibstoffe ging. Dass auch diese steigende Nachfrage zusammen mit der wirtschaftlichen Entwicklung die Lebensmittelkrise 2008 zu verantworten hat, ist naheliegend. Die Preisentwicklung für Zerealien, besonders Mais im Jahr 2011, spricht für sich.

13. „Land Grabbing“

Wenn die Flächen, die ein reiches Land für die Erzeugung von Lebensmitteln für die eigene Bevölkerung benötigt, nicht mehr ausreichen, weil sie für anderes, wie z. B. Biogas oder Solarparks, gebraucht werden, so scheint es naheliegend, solche Flächen dort zu holen, wo arme Länder Flächen anbieten, um damit „reicher“ zu werden. Der für den Kauf von Land in den letzten Jahren anerkannte Begriff „Land Grabbing“ beschreibt ins Deutsche übertragen am besten, was hinter dem Vorgang des Landkaufs steht: Land grabben, Land ergattern, Land an sich reißen. Landkauf ist ein Geschäftsmodell mit hoher Rendite, besonders dann, wenn die Bedingungen so günstig sind, wie dies seit einiger Zeit der Fall ist.

Weltweit gibt es etwa 445 Mio. ha nicht kultiviertes Land, dem 1,5 Mrd. ha kultiviertes gegenüber stehen (DEINIGER et al. 2011). Von diesen bisher nicht kultivierten Flächen liegt etwa die Hälfte in Afrika. Die steigenden Lebensmittelpreise 2007/2008 versprachen eine gute Rendite, wenn man diese Lebensmittel auch selbst produzieren konnte. Damit begann das Rennen um Flächen.

„Land Grabbing“ entwickelt sich stillschweigend, von der Öffentlichkeit kaum wahrgenommen. Und doch stellt es ein großes Problem dar, das kurzfristig zu erheblichen lokalen Konflikten führen kann. Die Länder bzw. Investoren, die Geld für Land ausgeben, wollen Flächen haben,

- auf denen die Nahrung für ihre eigene Bevölkerung angebaut werden kann, um so die Importe und damit die Kosten zu senken und um Risiken durch Trockenheit und Wasserknappheit zu umgehen (Interessenten sind vor allem die reichen Golfstaaten, aber auch China und Indien);
- um auf diesen Biomasse (jede Art von Pflanzen, die sich als Lebensmittel, Futtermittel oder für Biosprit lohnt) anzubauen, die sie im eigenen Land mangels Flächen nicht anbauen können, oder um damit Geschäfte zu machen (vor allem Europa, aber auch China gehören zu den Interessenten);
- die ausreichend bewässert werden können, um nicht nur Lebensmittel zum Verkauf auf dem Weltmarkt anbauen zu können (Interessenten sind diverse Länder sowie Privatinvestoren, die mit Land Profit machen wollen).

Von den Flächen, die verkauft oder durch Regierungen teilweise enteignet wurden, werden etwa 78% für die landwirtschaftliche Produktion verwendet, wobei 75% davon für den Anbau von Pflanzen zur Erzeugung von Bioethanol oder Diesel eingesetzt werden. Für die Lebensmittelproduktion sind dies dann gerade einmal 11%, wobei nicht vergessen werden darf, dass die meisten dieser Lebensmittel nicht im Land verbleiben. Die verbleibenden 22% entfallen auf Mineralgewinnung, Industrie, Tourismus und Waldbewirtschaftung (ANSEEUW et al. 2012). Afrika ist auch hier wieder Spitzenreiter, da dort 66% der Flächen für Biospriterzeugung genutzt werden (Asien 52%, Lateinamerika 35%). Das Argument, dass Flächen gekauft werden, die – erodiert und ausgelaugt – durch die dort

lebenden Menschen nicht mehr genutzt werden können, aber nun durch die Käufer mit den ihnen verfügbaren Techniken wieder für den Lebensmittelanbau hergerichtet werden, mag überzeugen. Dies aber nur, wenn die Lebensmittel den dort lebenden Kleinbauern wieder zufließen. Besser noch, wenn das urbar gemachte Land ihnen wieder verfügbar gemacht wird. Jedoch das Gegenteil ist der Fall. Der Kolonialismus, der sich nicht nur der Flächen bemächtigt hat, sondern auch der dort lebenden Menschen, ist einem Neokolonialismus gewichen, der nur noch die Flächen requiriert, die Menschen dabei aber außen vor lässt.

Im Januar 2012 kommt eine umfangreiche Analyse der Landverkäufe (ANSEEUW et al. 2012) zu den folgenden Schlüsselbotschaften:

- Der globale Bedarf an Land wird sich wahrscheinlich weiter fortsetzen, auch wenn der starke Anstieg der Verkäufe zwischen 2005 und 2008 wieder abgenommen hat.
- Die Rechte an Land und Ressourcen als auch an Lebensqualität der ländlichen Kommunen werden durch den überwiegend großflächigen Landerwerb gefährdet. Es gibt nur wenige Hinweise darauf, dass der Begriff „Landraub“ unverdient verwendet wird.
- Die Armen tragen unverhältnismäßig hohe Kosten, ernten aber nur geringe Vorteile, bedingt durch mangelnde Verantwortung der Verwaltung, einschließlich des fehlenden Schutzes ihrer Landrechte, korrupte Geschäftemacher und unrechtmäßige Verträge, darüber hinaus durch politische Vernachlässigung der kleinen Farmer und hier vor allem der Frauen.
- Der schwache bzw. fehlende rechtliche Schutz von Land, das zum Verkauf ansteht, macht die Landbesitzer wehrlos, wenn das Land durch die regionalen oder nationalen Regierungen enteignet und zum Kauf angeboten wird. Dies gilt vor allem für solche Flächen, die den kleinen Farmern seit Generationen gehören und für die kein Besitznachweis vorhanden ist.
- Die Regierungen, die Land anbieten, kümmern sich kaum um die weitere Verarmung, die Folge des „Landrausches“ ist. Gleiches gilt für die fehlende internationale Gesetzgebung.

Auch dies ist eine Form des *Hidden Hunger*, – der rücksichtslose Umgang mit eigenen Flächen zur Wahrung des Wohlstandes, der die Flächen zur Lebensmittelproduktion armer Länder zur Kompensation nutzt. Dies sehen wir nicht, da es sich eben außerhalb unseres Blickfeldes abspielt. Wenn wir Flächen sehen, die dazu dienen, das Klima zu schonen, wie die großen Solarparks oder die Mais- und Rapsfelder zur Erzeugung von Biogas, so mag dies unser Gewissen beruhigen, für den Hunger in der Welt ist es jedoch kaum ein Gewinn.

Welche Rolle dabei, wenn es um die Sicherung der Ernährung der besonders in Afrika wachsenden Weltbevölkerung geht, in Zukunft der Klimawandel spielen wird, ist schwer abzuschätzen. Sicherlich jedoch wird das sich verändernde Klima gerade in Afrika keinen günstigen Einfluss auf die Erträge haben.

Fazit: Biotreibstoffe, Landraub und Klimawandel werden dazu beitragen, dass sich die Preisschocks aus den Jahren 2008 und 2011 weiter fortsetzen und möglicherweise noch größere Dimensionen erreichen. Die Preise für die Grundnahrungsmittel werden auf dem jetzigen Niveau bleiben. Nach den Schätzungen der FAO (2011–2020) werden die Weltmarktpreise für Reis, Weizen, Mais und Ölsaaten in der Zeit zwischen 2015 und 2020 real um 40, 27, 48 und 36% höher sein als in der Zeit zwischen 1998 und 2003 (FAO 2011b). Dies bedeutet aber, dass die Armut nicht sinkt, sondern weiter steigt. Preisschwankungen, ganz besonders Preisschocks, bewirken auf der Haushaltsebene (Mikroökonomie) eine

Steigerung der Armut und eine Verringerung der Möglichkeiten, Landwirtschaft zu betreiben (abnehmende Investitionsmöglichkeiten). Makroökonomisch bewirken Preisschocks, dass die Bewirtschaftung von Vorräten unmöglich wird und dass die Produktivität sinkt.

Die verhängnisvolle Vernetzung von Biotreibstoffen, Lebensmittelpreisen, Klimawandel und Politik wird es kaum zulassen, dass sich die Zahl der Hungernden substantiell verringern wird. Das hat sich in den letzten Jahren bereits deutlich gezeigt. Gleiches gilt für die Zahl der vom *Hidden Hunger* Betroffenen. Hunger ist die Konsequenz vieler Einzelereignisse, die von den Betroffenen meist nicht verursacht sind. Der Kampf gegen den verborgenen Hunger muss an vielen Fronten geführt werden, und dies betrifft sowohl lokale wie globale Schauplätze. Politik und Handel müssen gemeinsam reagieren. Agrar- und Ernährungswissenschaften müssen zusammen arbeiten, ebenso wie Ökonomen und Umweltwissenschaftler.

14. Strategien gegen den *Hidden Hunger*

Strategien gegen den verborgenen Hunger müssen zunächst darauf abzielen, diesen aus seiner Verborgenheit zu holen, um einerseits rechtzeitig intervenieren zu können und um andererseits durch die Darstellung des Problems programmatische Ansätze in die richtige Richtung zu leiten. Dabei müssen unterschiedliche Zielgruppen ebenso wie unterschiedliche zeitlich gestaffelte Interventionen geprüft werden. Alle diese Vorgehensweisen darzustellen, würde den verfügbaren Rahmen sprengen. Im Folgenden sollen daher nur einige Ansätze erörtert werden, die sich direkt mit der Frage der Vorbeugung und Behandlung des *Hidden Hunger* befassen.

Allgemeine, für alle gültige Lösungen wird es nicht geben. Die Faktoren, die Armut und Hunger zur Folge haben, sind zu vielfältig und – wie etwa die Preise – eben auch volatil in ihrer Auswirkung. So wird es nötig sein, neben direkten Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgung der Bevölkerung auch strukturelle Veränderungen im gesellschaftlichen und politischen Bereich gezielt anzugehen. Dazu gehört auch, dass die vulnerablen Gruppen direkt versorgt werden und dass damit frühzeitig die Folgen des *Hidden Hunger* unterbunden werden.

15. „Therapie“ des 1000-Tage-Fensters

Die kritischste Phase, in der *Hidden Hunger* Folgen für das gesamte weitere Leben eines Menschen hat, ist das sogenannte 1000-Tage-Fenster. In diesem Zeitraum zwischen Konzeption und der frühkindlichen Entwicklung am Ende des 2. Lebensjahres werden die Weichen für die Zukunft gestellt. Weichen, die darüber entscheiden, ob Kinder in ihrer Entwicklung beeinträchtigt sind und auch als Erwachsene häufiger an den sogenannten Zivilisationskrankheiten leiden.

Die „Therapie“ des 1000-Tage-Fensters in Bezug auf den verborgenen Hunger lässt sich grob in drei Phasen unterteilen:

- Ernährung in der Schwangerschaft,
- Stillzeit,
- Zeit nach dem Stillen bis zum Ende des 2. Lebensjahres.

Aus der Sicht des Hungerkarussells scheint es am besten, die Verbesserung der Mikronährstoffversorgung als Krisenintervention zu Beginn des 1000-Tage-Fensters zu starten, sofern eine Mangelernährung nachgewiesen oder auf Grund der besonderen Situation wahrscheinlich ist. Letzteres ist immer dann der Fall, wenn die Ernährung einseitig ist und die betroffenen Frauen in Armut leben. Genau genommen sollte eine Multimikronährstoffsubstituierung bei jungen Mädchen erfolgen, die mangelernährt sind und die potentiell schwanger werden könnten. Solche Maßnahmen sollten immer mit einer Ernährungsaufklärung verbunden sein. Eine Vielzahl von Studien hat Multimikronährstoffe während der Schwangerschaft zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingesetzt und entweder gegen eine Supplementierung mit Folsäure und Eisen oder gegen Placebo getestet. Die Ergebnisse wurden in Metaanalysen verglichen. Die Resultate sind heterogen, und doch ergeben sich daraus neue Fragestellungen und Ansätze. So wurde in einer Metaanalyse, die 17 Studien umfasste, geprüft, ob die Gabe von Multimikronährstoffen im Vergleich zur Gabe von Eisen und Folsäure bei Schwangeren einen Vorteil hat (HAIDER et al. 2011). In beiden Fällen kam es zu einem signifikanten Rückgang der Anämie im dritten Trimenon. Dies bestätigen auch andere Studien, die zeigen, dass die Anämie bei Frauen auch mit Multimikronährstoffpräparaten alleine reduziert werden kann. Allerdings gibt es immer noch eine nicht unwesentliche Anzahl von Frauen (25–35%), bei denen die Anämie nicht verbessert werden konnte. Offensichtlich tragen weitere essentielle Faktoren in der Ernährung zur Anämie bei und können durch die gewählte Supplementierung nicht kompensiert werden. Dennoch haben verschiedene Länder und Fachgesellschaften (z. B. die Kanadische Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe) die Gabe von Multivitaminpräparaten in der Schwangerschaft empfohlen. Das wird auch bei ausreichend ernährten Frauen geraten, da Metaanalysen gezeigt hatten, dass durch die Gabe eines solchen Präparates die Zahl der angeborenen Missbildungen zurückging (WILSON et al. 2007, GOH et al. 2006).

Die Phase gegen Ende des Stillen, die von Beikost begleitet wird, ist gerade bei Kindern aus armen Verhältnissen hoch kritisch, solange entsprechend nahrhafte Lebensmittel fehlen bzw. auf Grund mangelnder Kenntnis nicht angeboten werden. Daher liegt ein Schwerpunkt in der Verbesserung der Ernährungsqualität durch Kombination verfügbarer Lebensmittel, um ausreichend Mikronährstoffe zuzuführen.

Die nachhaltigste Methode, um die Nahrhaftigkeit zu verbessern, besteht darin, das Spektrum an Lebensmitteln zu erweitern, also den *Diet Diversity Score* zu erhöhen. Das setzt neben den notwendigen monetären Mitteln auch Grundkenntnisse über die Lebensmittel voraus. Hier gibt es keine Patentlösung. Es müssen die jeweils verfügbaren Lebensmittel daraufhin geprüft werden, inwieweit sie zur Versorgung mit Mikronährstoffen beitragen. Auf dieser Grundlage können dann Empfehlungen zur Kombination von Lebensmitteln erfolgen.

Hierzu muss nicht nur die Verfügbarkeit von Lebensmitteln erfasst werden, sondern auch der Bedarf geprüft werden. Dazu genügen allgemeine Empfehlungen nicht, da das Nahrungsmuster stark kulturell geprägt ist und folglich starke Unterschiede aufweisen kann. Mit speziellen Programmen kann auf der Grundlage der verfügbaren nationalen Verzehrstudien die Versorgung mit Mikronährstoffen in Hinblick auf die dafür geeigneten Lebensmittelgruppen erfasst werden (Abb. 5). Auf diese Weise lassen sich Muster aus lokal verfügbaren Lebensmitteln zusammenstellen und so eine bessere Versorgung mit Mikronährstoffen erreichen.

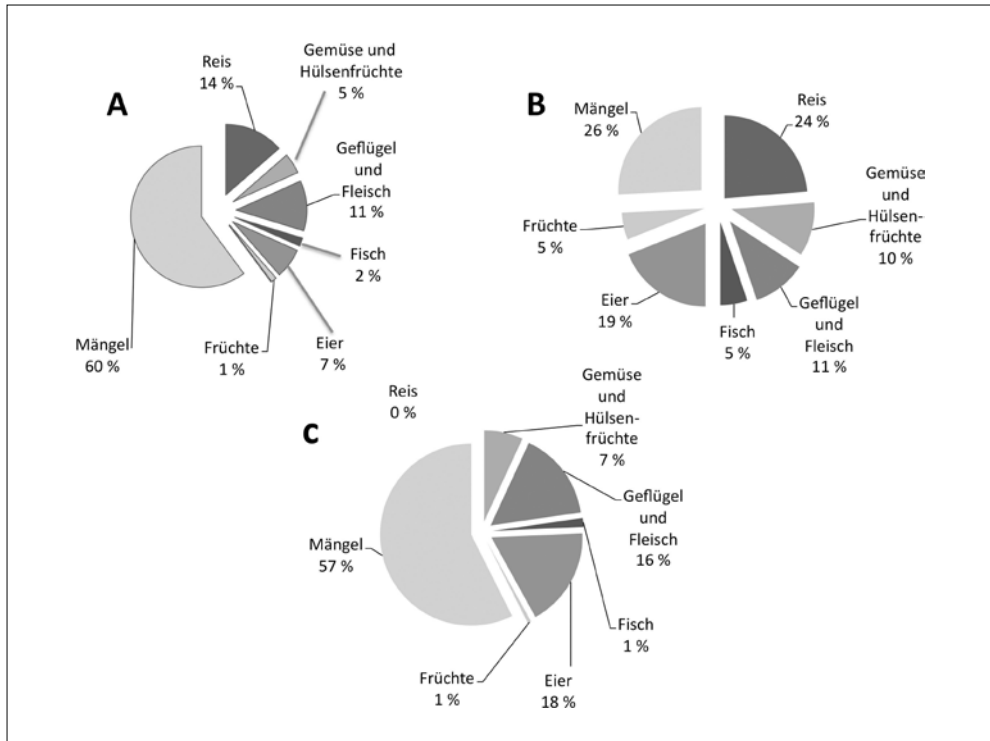


Abb. 5 Lebensmittelerverzehr von Kindern und Beitrag zur Deckung des Bedarfs an Eisen (A), Zink (B) und Vitamin A (C). Die Darstellung der einzelnen Lebensmittelgruppen erlaubt die Schließung der durch dieses Verfahren aufgedeckten Versorgungslücken (JAIN et al. 2013, modifiziert).

Auf der Basis solcher Analysen lässt sich nicht nur der Anteil des Mikronährstoffdefizits innerhalb einer Population analysieren, sondern es lassen sich auch gezielte Empfehlungen erarbeiten, wie diese Bedarfslücke geschlossen werden kann. Für den obigen Fall (Abb. 5) könnte bereits einiges erreicht werden, wenn ein Teil der Reisportion durch Süßkartoffeln oder farbige Reisvarietäten ersetzt würde. Auch Spinat und Obst sowie Palmöl können einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Ernährung leisten. Der große Vorteil solcher Analysen und Empfehlungen besteht darin, dass nicht nur traditionelle Lebensmittel und solche, die lediglich in bestimmten Regionen verfügbar sind, berücksichtigt werden, sondern auch die aufgrund des Preises möglichen Zusammenstellungen.

UNICEF, Weltbank sowie die wichtigen Organisationen, die sich mit Ernährungssicherung befassen (USAID, GAIN,¹¹ Micronutrient Forum, Flour Fortification Initiative), haben die Interventionen mit einzelnen Mikronährstoffen in Beziehung zu den Millenniumszielen gesetzt (SUN 2009, Tab. 5).

¹¹ USAID – United States Agency for International Development, GAIN – Global Aid Network.

Tab. 5 Forderungen zur Ernährungssicherung

Millenniumsziel	Rolle der Mikronährstoffe
Ziel 1 Beseitigung der extremen Armut und des Hungers	<ul style="list-style-type: none"> – Eisen kann Anämie beseitigen – steigert die Produktivität und das Einkommen – Salzdiodierung verringert Jodmangel – steigert Möglichkeiten zu Bildungserwerb, steigert berufliches Fortkommen und Verdienst – Zink verringert <i>Stunting</i> und seine Folgen
Ziel 2 Primarschulbildung für alle	<ul style="list-style-type: none"> – Salzdiodierung verbessert die kognitive Entwicklung – Eisen bei Kindern verbessert die kognitive Entwicklung – Zink verringert Krankheitstage und damit Fehltag in der Schule – Vitamin A verhindert Erblindung – Folsäure verhindert Entwicklungsschäden
Ziel 3 Gleichstellung der Geschlechter/ Stärkung der Rolle der Frauen	<ul style="list-style-type: none"> – Eisen steigert weibliche Produktivität – Behandlung der weiblichen Unterernährung hat einen größeren Effekt als bei Männern – verbesserte Mikronährstoffaufnahme kann dazu beitragen, Ungleichheiten im Zugang zu adäquaten und nährhaften Lebensmitteln auszugleichen
Ziel 4 Senkung der Kindersterblichkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Vitamin A verbessert signifikant das Überleben von Kindern – Zink verringert die Zahl der Durchfälle, eine wesentliche Ursache der Kindersterblichkeit – Salzdiodierung verringert Jodmangel und damit die Häufigkeit von Schwangerschaftskomplikationen, Totgeburten und neonatalen Todesfällen
Ziel 5 Verbesserung der Gesundheit von Müttern	<ul style="list-style-type: none"> – Eisen verbessert das mütterliche Überleben – Salzdiodierung verringert die Konsequenzen des Jodmangels, wie Spontanaborte, Totgeburten oder angeborene geistige Behinderungen oder Taubheit

Die Supplementierung mit einzelnen Vitaminen oder Mineralien birgt jedoch das Risiko, dass Teile des *Hidden Hunger*, also das Fehlen anderer Mikronährstoffe, übersehen werden. Daher wird zunehmend eine Multimikronährstoffsupplementierung gefordert (SEMBA et al. 2011). Solche Supplemente können in unterschiedlichen Formen als Mikronährstoffpulver für die Anreicherung der täglichen Mahlzeit sowie zur Ergänzung von sogenannten *Ready-to-use-Food* (RUF; Fertigmischungen, die mit Mikronährstoffen angereichert vor Ort hergestellt werden können) gegeben werden. Dabei ist allerdings mehr Mitarbeit und auch Sorgfalt der Betroffenen erforderlich als bei Programmen, die z. B. zweimal im Jahr hochdosiert Vitamin A verabreichen. Die Problematik einer längeren Gabe von Mikronährstoffen, sei es isoliert oder auch in Form der RUF, ist kürzlich eindrucksvoll an Zwillingstudien von Kindern mit und ohne schwere Mangelernährung dokumentiert worden (SMITH et al. 2013). Demnach kann durch RUF nur sehr vorübergehend die im Mangel gestörte Mikroflora und die damit einhergehende chronische Entzündung und Malabsorption beseitigt werden. Erst die Umstellung auf nahrhafte Lebensmittel führt zu einer Normalisierung. Die Kompensation einer mangelnden Lebensmittelvarietät durch Supplemente oder RUF kann nur als akute Intervention verstanden werden, der eine Verbesserung der Lebensmittelqualität folgen muss.

16. Verbesserung der Lebensmittelqualität

Verbesserung der Lebensmittelqualität, d.h. Steigerung der durch diese Lebensmittel verfügbaren Mikronährstoffe (Anreicherung), ist eine Maßnahme, die unter bestimmten Kriterien (z. B. kein Einfluss auf die Kosten der Herstellung gegenüber konventionellen Sorten, kein Einfluss auf den Verkaufspreis) zu einer nachhaltigen Verbesserung der Versorgung beitragen kann.

Ziel der Biofortifikation (Bioanreicherung) ist es, durch züchterische Verfahren die Mikronährstoffdichte in landwirtschaftlich erzeugten Grundlebensmitteln zu steigern, um damit die Versorgung der Bevölkerung mit Mikronährstoffen zu verbessern. Durch gezielte Suche nach Varietäten mit hoher Mikronährstoffdichte sollte es möglich sein, diese für die Landwirtschaft auch in armen Gebieten verfügbar zu machen. Bei Reis etwa gibt es Varietäten, die besonders viel Eisen enthalten, das offensichtlich auch eine gute Bioverfügbarkeit aufweist (HAAS 2005). Die Mikronährstoffe, die durch Biofortifikation in den Grundlebensmitteln angereichert werden sollen, sind Provitamin A in Cassava, Mais und Süßkartoffeln sowie Eisen und Zink in Bohnen, Reis und Weizen. Inwieweit diese Produkte dann für die arme Bevölkerung zur Verfügung stehen und damit einen Beitrag zur Vermeidung des *Hidden Hunger* leisten können, muss sich erst noch zeigen. Hier ist die Agrarforschung gefordert, Grundnahrungsmittel bereitzustellen, die anders als bisher reicher an verschiedenen Mikronährstoffen sind. Das bedeutet auch, dass neue Sorten gezüchtet und Anreicherungsverfahren entwickelt werden, die weniger ertragsorientiert und dafür umso mehr die Qualität im Auge haben. Möglicherweise kann so auf eine quantitative Ertragssteigerung verzichtet werden, wenn das Gesamtangebot nahrhafter ist.

17. Verbesserung der Rolle der Frauen

Wenn es um die Ernährung der Familie geht, stehen Frauen in ihrer Verantwortung für ihre Kinder ganz im Mittelpunkt. Diese Verantwortung ist auch ein wichtiger Grund, warum bei ihnen Mangelernährung weitaus häufiger auftritt als bei Männern. Frauen sparen an der eigenen Ernährung, wenn es um die Versorgung der Kinder geht.

Der Weltfrauenreport der FAO (2010–2011) fasst die Probleme der Frauen zusammen:

- Frauen haben einen wesentlichen Anteil an der landwirtschaftlichen Arbeitsleistung. Je nach landwirtschaftlichem Produkt kann diese Arbeitsleistung starken Schwankungen unterliegen.
- Grundsätzlich haben die in der Landwirtschaft arbeitenden Frauen weniger Zugang als Männer zu den Produktionsmitteln, wie Land, technisches Gerät, Saatgut, und den weiteren Angeboten, wie Bildung, Finanzen, Gesundheitsfürsorge.
- Die Gleichstellung der Frau würde einen erheblichen Einfluss auf die landwirtschaftliche Entwicklung sowie die Ernährungssicherheit haben. Wenn Frauen denselben Zugang zu den Produktionsmitteln wie die Männer hätten, könnten sie die landwirtschaftlichen Erträge um 20–30% steigern. Rechnerisch würde dies eine Verringerung der Hungernden um 12–17% ergeben (allerdings auch nur über die Energiekalkulation).

Entsprechende politische Interventionen sollten in erster Linie die folgenden Prioritäten setzen:

- Eliminierung der Diskriminierung von Frauen in Bezug auf landwirtschaftliche Ressourcen, Erziehung, finanzielle Unterstützung und Arbeitsplätze;
- Investitionen in technische Mittel und Infrastruktur, um die Arbeitsbelastung für Frauen zu verringern und sie so für andere produktive Aufgaben (auch in der Familie) freizustellen;
- Erleichterung der Teilnahme von Frauen an flexiblen, effektiven und fairen ländlichen Arbeitsmärkten.

Die Chancen eines Kindes zu überleben steigen um 20%, wenn die Mutter das Haushaltsgeld kontrolliert (WALSH 1998). Die wesentlichen Gründe hierfür sind nach WALSH die folgenden:

- Frauen sind in die Kontrolle der Lebensmittelsicherheit und der Kinderernährung weit- aus zentraler eingebunden als Lebensmittelhersteller, Unterhaltsverdiener, Lebensmittelverarbeiter oder Kinderbetreuer.
- Ressourcen, einschließlich Nahrungsmittel, die unter weiblicher Kontrolle stehen, werden mit größerer Wahrscheinlichkeit zugunsten des Haushalts und der Bedürfnisse der Kinder eingesetzt.
- Innerhalb des Haushalts ist es wahrscheinlicher, dass Frauen die Lebensmittel kontrollieren und für die Ernährung der Familie verwenden, während Männer häufiger damit beschäftigt sind, Geld zu verdienen und dieses zu kontrollieren. Die Ernährung der Familie ist dabei oft nur ein Aspekt unter vielen, für die Männer Geld ausgeben.
- Erzeugte Lebensmittel werden von Männern öfter verkauft oder gehandelt, um *Non-Food*-Produkte zu erwerben.

Selbst wenn solche Aussagen nicht verallgemeinert werden können, so enthalten sie doch wesentliche Aspekte, die nahelegen, die Versorgung der Familie mit Lebensmitteln, was den Einkauf und die Verwertung mit einbezieht, in die Hände der Frauen zu legen.

18. Subsistenzlandwirtschaft

Blicken wir in die vergangenen Jahrhunderte zurück, so war es immer – wie heute – die Landbevölkerung, die arm war und von Hungerkatastrophen, gleichgültig welcher Ursache, am meisten betroffen war. Dies galt dann besonders, wenn sie die von ihr angebauten Güter abgeben musste und für sich selbst zu wenig hatte. Zur eigenen Ernährungssicherung wurden daher kleine Hausgärten angelegt, in denen Obst und Gemüse angebaut wurde. Dies war der mehr oder weniger erfolgreiche Versuch, sich von den Lebensmitteln, die man mangels Einkommen nicht kaufen konnte, unabhängig zu machen. Ähnliche Entwicklungen werden heute wieder sichtbar, vor allem in westlichen Industrienationen (z. B. Griechenland). Eine solche Form der Selbsterhaltung wird auch Subsistenz genannt.

Die Mehrheit der Hungernden und Unterernährten leben von der Landwirtschaft. Es sind kleine Farmer mit wenig Land, die in den meisten Fällen viel zu wenig haben, um damit Gewinn erwirtschaften zu können. Folglich sind sie darauf angewiesen, von dem, was sie erwirtschaften, sich und ihre Familie zu ernähren. Um dies zu leisten, sind wenige, aber wesentliche Voraussetzungen erforderlich:

- Die Kleinbauern müssen mit dem, was sie erwirtschaften, die Familie quantitativ und qualitativ ausreichend ernähren können (qualitative und quantitative Subsistenz). Diese notwendige *Diet Diversity* sollte vor dem Hintergrund der traditionellen Lebensmittel qualitativ und quantitativ für die jeweilige Region definiert werden.
- Die Kleinbauern brauchen eine ihnen gehörende, definierte Fläche, die für den Anbau unterschiedlicher Agrarprodukte ausreichend ist (je nach Klima und Bodenverhältnissen bemessen).
- Nicht Ertragssteigerung, sondern Ertragsanpassung unter quantitativem wie qualitativem Aspekt an die gegebenen Verhältnisse muss das primäre Ziel sein.
- Weideland zur Haltung von Vieh ist eine wesentliche Grundlage für eine Verbesserung der Ernährung.

Die Förderung der Subsistenzlandwirtschaft heißt nichts anderes, als den Hungernden wieder die Möglichkeit zu geben, in Würde und mit einer lebenswerten Zukunftsperspektive selbstbestimmt ihr Leben zu gestalten.

19. Fazit

Der verborgene Hunger wird aus den verschiedensten Gründen verborgen bleiben, solange er sich nicht sichtbar macht, da er weder subjektiv noch objektiv wahrgenommen wird. Wird er jedoch nicht gezielt gesucht, so wird er verborgen bleiben und das Leben der Betroffenen nachhaltig beeinträchtigen. Während in Entwicklungsländern bereits oft ein Blick auf den Teller genügt, um den *Hidden Hunger* zu entlarven, ist dies in entwickelten Ländern weitaus schwieriger. Objektiv betrachtet ist ja genug da für alle und somit kein Bedarf erkennbar, der Frage des *Hidden Hunger* nachzugehen. Schaut man jedoch etwas genauer hin, so wird man dieselben Muster aus Armut und Preisniveau mit den entsprechenden Folgen für die Armen erkennen, wie sie in Entwicklungsländern bereits seit langem bekannt sind. Armut ist die wesentliche Ursache für eine unzureichende Ernährung, und die Beobachtung der Entwicklung armer Kinder zeigt dies exemplarisch: Die schulischen Leistungen sind schlechter, sie sind häufiger krank, sie haben ein höheres Risiko für Übergewicht und Zivilisationskrankheiten (besonders metabolisches Syndrom) (DEBOER et al. 2012), und ihre mittlere Lebenserwartung ist gegenüber Kindern aus besser gestellten Familien deutlich geringer. Neben dem Umfeld dieser Kinder ist Ernährung ein Faktor, der zu dieser Entwicklung mit beiträgt, aber Ernährung kann durch entsprechende Maßnahmen weitaus besser und nachhaltiger optimiert werden als das soziale Umfeld. Will man den *Hidden Hunger* enttarnen, so ist genaues Hinsehen auf die Lebensumstände und die Ernährung meist schon genug.

Literatur

- ABOUZAHRA, C.: Global burden of maternal death and disability. *Br. Med. Bull.* 67, 1–11 (2003)
- AGUAYO, V. M., and BAKER, S. K.: Vitamin A deficiency and child survival in sub-Saharan Africa: a reappraisal of challenges and opportunities. *Food Nutr. Bull.* 26, 348–355 (2005)
- AKMAN, M., CEBECI, D., OKUR, V., ANGIN, H., ABALI, O., and AKMAN, A. C.: The effects of iron deficiency on infants' developmental test performance. *Acta Paediatr.* 93, 1391–1396 (2004)
- ALEXU, U., BOLZENIUS, K., KÖPPER, A., and CLAUSEN, K. M.: Diet costs and energy density in the diet of German children and adolescents. *Eur. J. Clin. Nutr.* 66, 1362–1363 (2012)
- ALEXU, U., und KERSTING, M.: Lebensmittelkosten der Kinderernährung und Hartz IV. *Prävention* 3, 72–75 (2012)
- ANSEEUW, W., WILY, L. A., COTULA, L., and TAYLOR, M.: Land Rights and the Rush for Land. Findings of the Global Commercial Pressures on Land Research Project. Rome: ILC 2012
- BATEN, J., and BOHM, A.: Childrens height and parental unemployment: a large-scale anthropometric study on eastern Germany, 1994–2006. *German Economic Rev.* 11, 1–24 (2010)
- BIESALSKI, H. K.: *Der Verborgene Hunger – Satt sein ist nicht genug*. Heidelberg: Springer 2012
- BLACK, R. E., ALLEN, L. H., BHUTTA, Z. A., CAULFIELD, L. E., ONIS, M. DE, EZZATI, M., MATHERS, C., RIVERA, J., and *Maternal and Child Undernutrition Study Group*: Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *Lancet* 371, 243–260 (2008)
- BOZZOLI, C., DEATON, A., and QUINTANA-DOMEQUE, C.: Adult height and childhood disease. *Demography.* 46/4, 647–669 (2009)
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales*: Lebenslagen in Deutschland. Der dritte Armuts- und Reichtumsbericht der Bundesregierung. (2012)
- COLCHESTER, M., and CHAO, S. (Eds.): *Oil Palm Expansion in South East Asia. Trends and Implications for Local Communities and Indigenous Peoples*. Moreton-in-Marsh, Bogor: Forest Peoples Programme and Perkumpulan Sawit Watch 2011
- COLEMAN-JENSEN, A., NORD, M., ANDREWS, M., and CARLSON, S.: Household Food Security in the United States. Economic Research Report No. 125. Washington: US Department of Agriculture 2011a
- COLEMAN-JENSEN, A., NORD, M., ANDREWS, M., and CARLSON, S.: Hunger in America: United States Hunger and Poverty Facts. World Hunger Education Service. Household Food Security in the United States in 2010. Economic Research Report No. 37 (2011b)
- COMPTON, J., WIGGINS, S., and KEATS, S.: Impact of the Global Food Crisis on the Poor: What is the Evidence? ODI Report 99. London 2010
- DARMON, N., and DREWNOWSKI, A.: Does social class predict diet quality? *Amer. J. Clin. Nutr.* 87, 1107–1117 (2008)
- DEBOER, M. D., LIMA, A. A., ORÍA, R. B., SCHARF, R. J., MOORE, S. R., LUNA, M. A., and GUERRANT, R. L.: Early childhood growth failure and the developmental origins of adult disease: do enteric infections and malnutrition increase risk for the metabolic syndrome? *Nutr. Rev.* 70/11, 642–653 (2012)
- DEININGER, K., and BYERLEE, D.: The rise of large farms in land abundant countries. Do they have a future? *World Development* 40, 701–714 (2011)
- DREWNOWSKI, A., and SPECTER, S. E.: Poverty and obesity: the role of energy density and energy costs. *Amer. J. Clin. Nutr.* 79, 6–16 (2004)
- DU PREL, X., KRÄMER, U., and RANFT, U.: Changes in social inequality with respect to health-related living conditions of 6-year-old children in East Germany after re-unification. *BMC Public Health.* 8/5, 64 (2005)
- FAO (Food and Agriculture Organization): *The State of Food Insecurity in the World 2011*. Rome: FAO 2011a
- FAO (Food and Agriculture Organization): *Agricultural Outlook 2011–2020*. Rome: FAO 2011b
- GOH, Y. I., BOLLANO, E., EINARSON, T. R., and KOREN, G.: Prenatal multivitamin supplementation and rates of congenital anomalies: a meta-analysis. *J. Obstet. Gynaecol. Can.* 28, 680–689 (2006)
- HAAS, J. D., BEARD, J. L., MURRAY-KOLB, L. E., DEL MUNDO, A. M., FELIX, A., and GREGORIO, G. B.: Iron-biofortified rice improves the iron stores of nonanemic Filipino women *J. Nutr.* 135, 2823–2830 (2005)
- HAIDER, B. A., YAKOOB, M. Y., and BHUTTA, Z. A.: Effect of multiple micronutrient supplementation during pregnancy on maternal and birth outcomes. *BMC Public Health.* 13/11 Suppl 3, 19 (2001)
- Hunger in America: United States Hunger and Poverty Facts*. 2013
www.worldhunger.org/articles/.../us_hunger_facts.h

- IFPRI* (International Food Policy Institute): Annual Report 2008/2009 (2009)
- IMDAD, A., and BHUTTA, Z.: Effect of preventive zinc supplementation on linear growth in children under 5 years of age in developing countries: a meta-analysis of studies for input to the lives saved tool. *BMC Public Health* 11, Suppl. 3, S22 (2011)
- IZiNCG* (International Zinc Consultative Group): Quantifying the Risk of Zinc Deficiency. (2006)
- JATI, I. R., VADIVEL, V., NÖHR, D., and BIESALSKI, H. K.: Nutrient density score of typical Indonesian foods and dietary formulation using linear programming. *Public Health Nutr.* 25, 1–8 (2012)
- KAMENSKY, J.: Fehl ernährt, weil das Geld fehlt? Essverhalten von armen Kindern und Ansätze der Gesundheitsförderung. In: Was uns schmeckt bewegt uns. Hamburgische Arbeitsgemeinschaft für Gesundheitsförderung e. V. (Hrsg.) Hamburg: 2005
- KERSTING, M., und CLAUSEN, K.: Wie teuer ist eine gesunde Ernährung für Kinder und Jugendliche? *Ernähr. Umschau* 54, 508–513 (2007)
- LEVINE, S.: The 2007/2008 Food Price Acceleration in Namibia: An Overview of Impacts and Policy Responses. *Food Security* 4/1, 59–71 (2012)
- LMC International Biofuels and Biomass*: Assessing biofuels. www.unep.org (2010)
- LOZOFF, B., and JIMINEZ, E.: Double burdens of iron deficiency and low socio-economic status: A longitudinal analysis of cognitive test scores to 19 years. *Arch. Ped. Adolesc. Med.* 160, 11081–1113 (2006)
- MAYO-WILSON, E., IMDAD, A., HERZER, K., YAKOOB, M. Y., and BHUTTA, Z. A.: Vitamin A supplements for preventing mortality, illness, and blindness in children aged under 5: systematic review and meta-analysis. *Br. Med. J.* 343, 1–19 (2011)
- METALLINOS-KATSARAS, E., MUST, A., and GORMAN, K.: A longitudinal study of food insecurity on obesity in pre-school children. *J. Acad. Nutr. Diet.* 112/12, 1949–1958 (2012)
- ONIS, M. DE, BLÖSSNER, M., and BORGHI, E.: Prevalence and trends of stunting among pre-school children, 1990–2010. *Public Health Nutrition* 15, 142–148 (2012)
- Oxfam*: Global Report 2008–2009. (2009)
- PAWELLEK, I., DOKOUPIL, K., and KOLETZKO, B.: Prevalence of malnutrition in paediatric hospital patients. *Clin. Nutr.* 27/1, 72–76 (2008)
- PELLETIER, E. L., FRONGILLO, D. A. Jr., SCHRÖDER, D. G., and HABICH, J. P.: The effects of malnutrition on childhood mortality in developing countries. *Bull. WHO* 73, 443–448 (1995)
- PERNA, L., BOLTE, G., MAYRHOFER, H., SPIES, G., and MIELCK, A.: The impact of the social environment on children's mental health in a prosperous city: an analysis with data from the city of Munich. *BMC Public Health* 21/10, 199 (2010)
- Safe the Children*: A Life Free from Hunger: Tackling Child Malnutrition. 2012
www.savethechildren.org.uk/.../life-free-hunger-tac
- SCOTT, J. M.: Nutritional anemia: B-vitamins. In: KRAEMER, K., and ZIMMERMANN, M. B. (Eds.): *Nutritional Anemia*. Basel: Sight and Life Press 2007
- SEMBA, R. D., MOENCH-PFANNER, R., SUN, K., PEE, S. DE, AKHTER, N., RAH, J. H., CAMPBELL, A. A., BADHAM, J., BLOEM, M. W., and KRAEMER, K.: Consumption of micronutrient-fortified milk and noodles is associated with lower risk of stunting in preschool-aged children in Indonesia. *Food Nutr. Bull.* 32/4, 347–353 (2011)
- SEMBA, R. D., PEE, S. DE, SUN, K., BLOEM, M. W., and RAJU, V. K.: The role of expanded coverage of the national vitamin A program in preventing morbidity and mortality among preschool children in India. *J. Nutr.* 140/1, 208S–212S (2009)
- SHANKAR, A. H., and PRASAD, A. S.: Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *Amer. J. Clin. Nutr.* 68, Suppl. 2, 447S–463S (1998)
- SMITH, M. I., YATSUNENKO, T., MANARY, M. J., TREHAN, I., MKAKOSYA, R., CHENG, J., KAU, A. L., RICH, S. S., CONCANNON, P., MYCHALECKY, J. C., LIU, J., HOUP, E., LI, J. V., HOLMES, E., NICHOLSON, J., KNIGHTS, D., URSELL, L. K., KNIGHT, R., and GORDON, J. I.: Gut microbiomes of Malawian twin pairs discordant for kwashiorkor. *Science* 339, 548–554 (2013)
- SUN*: Investigating in the Future. A United Call to Action on Vitamin and Mineral Deficiencies. Global Report (2009)
- WALSH, M.: Women in Food Interventions: Impacts and Issues. WHO 1998
- WHO* (World Health Organization): World Health Report. WHO 2002
- WEHLER, L., and PERLOFF, J. C.: Hunger: Its impact on children's health and mental health. *Pediatrics* 110, 1–9 (2002)

- WEINREB, L., WEHLER, C., PERLOFF, J., SCOTT, R., HOSMER, D., SAGOR, L., and GUNDERSEN, C.: Hunger: its impact on children's health and mental health. *Pediatrics* 110, 41–50 (2002)
- WILSON, R. D., JOHNSON, J. A., WYATT, P., ALLEN, V., GAGNON, A., LANGLOIS, S., BLIGHT, C., AUDIBERT, F., DÉSI-LETS, V., BROCK, J. A., KOREN, G., GOH, Y. I., NGUYEN, P., KAPUR, B., and *Genetics Committee of the Society of Obstetricians and Gynaecologists of Canada and The Motherisk Program*: Pre-conceptional vitamin/folic acid supplementation 2007: the use of folic acid in combination with a multivitamin supplement for the prevention of neural tube defects and other congenital anomalies. *J. Obstet. Gynaecol. Can.* 29/12, 1003–1026 (2007)
- World Bank*: 2012 Global Monitoring Report. (2012a)
- World Bank*: Food Price Watch. (2011)
- World Bank*: Food Price Watch. (2012b)

Prof. Dr. Hans K. BIESALSKI
Universität Hohenheim
Institut für Biologische Chemie und Ernährungswissenschaft
Garbenstraße 30
70599 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 711 45924112
Fax: +49 711 45923822
E-Mail: biesal@uni-hohenheim.de

Prävention von Zoonosen

Thomas C. METTENLEITER ML (Greifswald, Insel Riems)

Mit 3 Abbildungen und 2 Tabellen



Zusammenfassung

Zoonosen, d. h. Infektionen, die zwischen Tier und Mensch übertragen werden, kommen wieder zunehmend in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Die Bovine Spongiforme Enzephalopathie („Rinderwahn“), Infektionen mit Aviärem Influenzavirus vom Typ H5N1 („Vogelgrippe“) oder die pandemische H1N1-Influenza („Schweinegrippe“) besetzen die Schlagzeilen. Weltweit werden nach Schätzungen der WHO 26% aller menschlichen Todesfälle durch Infektionskrankheiten hervorgerufen. Es wird davon ausgegangen, dass zwei Drittel aller Infektionen des Menschen einen tierischen Ursprung haben, bei den neu auftauchenden, sogenannten ‚emerging infections‘ sogar 75%. Müssen wir uns daher vor unseren (Nutz)Tieren als möglichen Überträgern tödlicher Infektionen fürchten? In unseren Breiten ist die Gefahr, sich mit hochpathogenen Erregern direkt am (Nutz)Tier anzustecken, gering. Durch intensive Kontrollprogramme wurden viele der lebensbedrohenden Zoonosen vor allem im Nutztierbereich getilgt, darunter Rindertuberkulose und -brucellose, Milzbrand oder auch BSE. Hierzu sind die meisten Infektionen auf mit zoonotischen Erregern kontaminierte Lebensmittel zurückzuführen, wobei diese Erreger beim Tier meist unauffällig bleiben. Gefahr droht aber durch die Einschleppung bisher als ‚exotisch‘ angesehener Erreger, die sich durch globale Mobilität, soziale Veränderungen (Urbanisierung, Landnutzung) und Klimawandel ebenso wie ihre Überträger (Vektoren) massiv ausbreiten. Wachsamkeit und Vorsicht sind also durchaus angezeigt. Die Entwicklung schneller Diagnosemethoden, neuartiger Impfstoffe und effizienter Managementpraktiken ist notwendig, um global eine Verbesserung der Situation zu erreichen.

Abstract

Zoonoses, i. e. infections that are transmissible between animals and humans, are increasingly recognized as threatening the health of animal and human populations alike. Bovine spongiform encephalopathy (‘Mad Cow Disease’), infection with avian H5N1 influenza virus (‘bird flu’) or pandemic H1N1 influenza (‘swine flu’) hit the news. Globally, WHO estimates that 26% of human deaths are due to infectious diseases. 2/3 of human infections originate directly or indirectly from animals. Within the so-called ‘emerging’ infections, zoonoses account for up to 75%. So, do we have to be afraid of our animals as potential source of deadly infections? In our region, the danger of contracting a life-threatening infection directly from contact with animals is low. Intensive disease control programs resulted in the eradication of many dangerous zoonoses from domestic animals including bovine tuberculosis, brucellosis, anthrax or BSE. Most of the zoonotic infections nowadays occur by consumption of food contaminated with agents which frequently do not cause disease in the animal host. However, there is a constant danger of introduction of infectious agents hitherto regarded as ‘exotic’, which exhibit a massive spread, as do their vectors, under the developing conditions of mass tourism, global trade, alterations in social behaviour (urbanization, intensive land use) and climate change. Thus, awareness and caution are justified. The development of rapid diagnostics, novel vaccines and efficient management practices is required to improve the situation globally.

1. Zoonosen – weltweit verbreitet

Zoonosen sind Infektionskrankheiten, die zwischen Tier und Mensch übertragen werden. Gerade in letzter Zeit kommen diese wieder zunehmend in das Bewusstsein der Öffentlichkeit. Die Bovine Spongiforme Enzephalopathie („Rinderwahn“), Infektionen mit Aviärem Influenzavirus vom Typ H5N1 („Vogelgrippe“) oder die pandemische H1N1-Influenza („Schweinegrippe“) besetzten die Schlagzeilen. Selbst Hollywood hat sich diesem Thema mit Filmen wie *Outbreak* oder *Contagion* angenommen. Wie gefährlich ist die Situation wirklich, müssen wir uns in der Tat vor unseren (Nutz)Tieren als Seuchenüberträgern in Acht nehmen?

Schätzungen der WHO zufolge werden 26% aller menschlichen Todesfälle durch Infektionskrankheiten hervorgerufen. Dabei ist davon auszugehen, dass zwei Drittel aller Infektionen des Menschen einen tierischen Ursprung haben, bei den neu auftauchenden, sogenannten ‚emerging infections‘ sogar 75% (Abb. 1; KARESH et al. 2012).

In unseren Breiten ist die Gefahr, sich mit lebensbedrohenden Erregern direkt am Tier anzustecken, aber gering. Durch intensive Kontrollprogramme wurden viele der klassischen Zoonosen vor allem im Nutztierbereich getilgt (Abb. 2).

Nach den Statistiken des Robert-Koch-Instituts (www.survstat.de) sind hierzulande die weitaus überwiegende Anzahl von zoonotischen Infektionen auf den Verzehr von mit Erregern kontaminierten Lebensmitteln zurückzuführen (Tab. 1). Häufig verursachen diese Erreger beim Tier keine oder nur milde Krankheitserscheinungen. Die Einhaltung von Grundregeln der Lebensmittelhygiene, wie Händewaschen oder angemessene Aufbewahrung und Zubereitung von Speisen, ist oberstes Gebot, um nahrungsmittelbedingte Infektionen zu vermeiden.

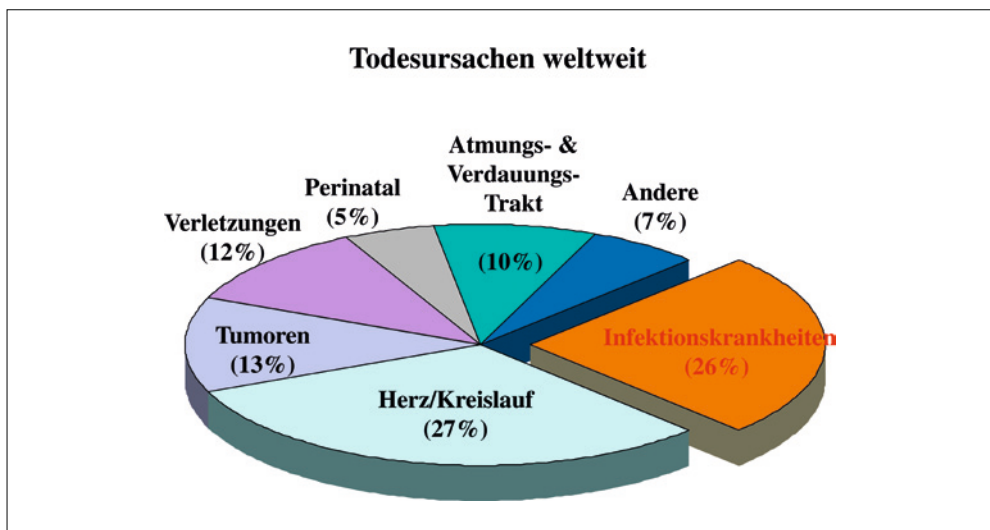


Abb. 1 Prozentualer Anteil der gelisteten Krankheiten an den weltweiten Todesursachen nach *WHO Health Report 2008*

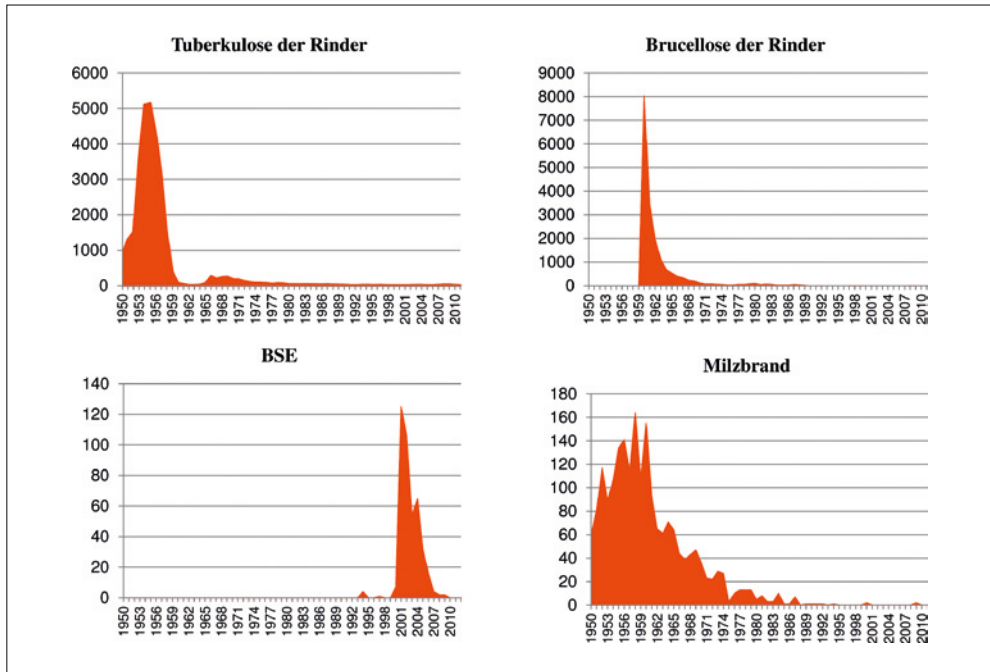


Abb. 2 Anzahl gemeldeter Ausbrüche der angezeigten Zoonosen in Deutschland von 1950–2011

Tab. 1 Fallzahlen der wichtigsten Zoonosen in Deutschland (Quelle: Robert-Koch-Institut SurvStat@rki). Die weitaus überwiegende Zahl der gemeldeten Tuberkuloseerkrankungen ist nicht auf Infektion mit vom Tier stammenden Erregern zurückzuführen. Die EHEC/STEC-Epidemie 2011 war auf kontaminierte Pflanzensprossen und nicht auf direkten Tierkontakt zurückzuführen. Diese Zahlen sind daher in Klammern gesetzt.

Erkrankung (Zoonose)	Anzahl gemeldeter Fälle im jeweiligen Jahr	
	2011	2012
Brucellose	24	28
Campylobacter	71309	62134
EHEC/STEC	(4907)	1516
FSME	423	193
Hantavirus	305	2784
HUS	880	69
Ornithose	16	16
Q-Fieber	285	194
Salmonellose	24518	20496
(Tuberkulose)	(4310)	(4140)

Besonders in den ärmeren Regionen der Erde stellen Zoonosen aber eine tägliche tödliche Bedrohung dar. Nach einem Bericht des *International Livestock Research Institute* (ILRI) in Nairobi (Kenia) sind die 13 wichtigsten Zoonosen jährlich für 2,2 Millionen Todesfälle und 2,4 Milliarden Erkrankungen in der menschlichen Bevölkerung verantwortlich (Tab. 2; GRACE et al. 2012).

Tab. 2 Die wichtigsten Zoonosen weltweit (GRACE et al. 2012). Neben den geschätzten bzw. gemeldeten humanen Todes- und Erkrankungszahlen wird auch eine Einschätzung der Bedeutung von Wildtieren vorgenommen.

Erkrankung	Bedeutung von Wildtieren	Todesfälle beim Menschen jährlich	Betroffene Menschen jährlich
Darmerkrankungen (zoonotisch)	wichtig	1 500 000	2 333 000 000
Leptospirose	sehr wichtig	123 000	1 700 000
Zystizerkose	einige Bedeutung	50 000	50 000 000
Tuberkulose (zoonotisch)	einige Bedeutung	100 000	554 500
Tollwut (Rabies)	wichtig	70 000	70 000
Leishmaniose	wichtig	47 000	2 000 000
Brucellose	einige Bedeutung	25 000	500 000
Echinokokkose	wichtig	18 000	300 000
Toxoplasmose	wichtig	10 000	2 000 000
Q-Fieber	wichtig	3 000	3 500 000
Trypanosomiasis (zoonotisch)	wichtig	2 500	15 000
Milzbrand (Anthrax)	einige Bedeutung	1 250	11 000
Hepatitis E	einige Bedeutung	300 000	14 000 000
Chagas-Krankheit	wichtig	10 000	8 000 000
Chickungunya-Fieber	sehr wichtig	12 500	500 000
<i>Clostridium difficile</i> -Infektion	Bedeutung möglich	3 000	300 000
Dengue-Fieber	gering	20 000	50 000 000
Ebola-Viruskrankheit	sehr wichtig	500	800
Hanta-Viruskrankheit	sehr wichtig	1 750	175 000
Aviäre Influenza	wichtig	77	145
Bovine spongiforme Enzephalopathie	einige Bedeutung	182	188
Psittakose	wichtig	2 250	22 000
Japan-Enzephalitis	möglich, Fledermäuse	11 000	40 000
Buffalopox-Viruskrankheit	nicht wichtig	vernachlässigbar	allgemein
Rift-Valley-Fieber	wichtig	45	150

Die höchste Belastung durch Zoonosen wird dabei in Indien registriert, es folgen Nigeria, die Demokratische Republik Kongo, China und Äthiopien (GRACE et al. 2012). Neben den erfahrenen körperlichen Leiden verursachen Zoonosen auch erhebliche wirtschaftliche Verluste. Die Weltbank schätzt die Einbußen in der Dekade 2001–2010 auf mehr als 200 Milliarden US-\$.

2. Globalisierung – auch von Zoonosen

„Endemische Zoonosen“, wie die Rinderbrucellose, sind bei uns weitgehend ausgerottet, Gefahr droht aber durch die Einschleppung bisher als „exotisch“ angesehener „epizootischer“ Zoonosenerreger, die sich durch globale Mobilität, soziale Veränderungen (Urbanisierung, Landnutzung) und Klimawandel ebenso wie ihre Überträger (Vektoren) stark ausbreiten (KARESH et al. 2012, HASNAIN et al. 2012). Gründe dafür sind der stark gestiegene interkontinentale Personenverkehr mit der Einreise potenziell infizierter Personen bzw. der Einfuhr möglicherweise kontaminierter Lebensmittel, der weltweite Handel mit Tieren und tierischen Produkten, die Verschleppung durch unbelebte Vektoren wie Fahrzeuge oder Gegenstände, die mit Tieren oder Produkten von Tieren in Kontakt kommen, aber auch die Verbringung von belebten Vektoren wie z. B. Arthropoden oder Nagetieren. Ein Beispiel für die annähernd globale Ausbreitung eines ursprünglich auf Gebiete Asiens begrenzten Vektors ist die asiatische Tigermücke *Aedes albopictus*, die Überträger einer Reihe von zoonotischen Erregern ist (KILPATRICK und RANDOLPH 2012). Durch die Einreise eines infizierten Touristen aus dem Endemiegebiet des Chikungunya-Virus in Indien nach Oberitalien und der Präsenz einer sich dort etablierenden *A. albopictus*-Population wurden Bedingungen für eine erstmals beobachtete autochthone Epidemie dieses Erregers in Europa geschaffen. *A. albopictus* und die verwandte asiatische Buschmücke *A. japonicus* wurden kürzlich auch in Deutschland nachgewiesen (WERNER et al. 2012).

3. „Emerging Zoonoses“

Während die endemischen Zoonosen selten in die Schlagzeilen kommen, sind die sogenannten „emerging zoonoses“ publikumswirksamer. Als „emerging“ werden Infektionen bezeichnet, die durch signifikante Veränderung eines bekannten Erregers, durch das Auftauchen eines Erregers in bisher freien Regionen oder durch bisher nicht beschriebene Erreger verursacht werden. Etwa drei Viertel der unter diese Definition fallenden Infektionen haben einen zoonotischen Charakter (JONES et al. 2008, KARESH et al. 2012). Ein Beispiel hierfür ist die Einschleppung, Ausbreitung und Etablierung des West-Nil-Virus auf dem nordamerikanischen Kontinent und die Expansion dieses Erregers in Europa (KILPATRICK und RANDOLPH 2012). Verschiedentlich haben neue Erreger auch den Weg nach Europa gefunden und sich dort, zumindest für eine gewisse Zeit, etabliert. Hierzu gehören der Erreger der Blauzungenkrankheit, für die Wiederkäuer empfänglich sind, und das neu entdeckte Schmallenberg-Virus (HOFFMANN et al. 2012). Glücklicherweise handelt es sich bei beiden nicht um zoonotische Viren. Die Szenarien zeigen aber, dass entsprechende Eintrittswege und Etablierungsstrategien für „exotische“ Erreger auch in unseren Breiten vorkommen.

4. „One Health“-Initiative

Die Bedeutung der Zoonosen macht eine enge interdisziplinäre Kooperation von Human- und Veterinärmedizin unter Einbeziehung der Natur-, Umwelt- und Sozialwissenschaften unumgänglich. Schon Rudolf VIRCHOW schrieb 1875: „Zwischen Tier- und Menschenarzneikunde ist oder sollte wissenschaftlich keine Scheidegrenze sein. Das Objekt ist verschieden, aber

die Erfahrungen, die aus dem Objekt zu schöpfen sind, sind Lehrsätze, welche die Grundlage der Doktrinen bilden. Daher hat sich auch von Seiten der Wissenschaft die Verbindung zwischen Tier- und Menschenarzneimedisin immer inniger gestaltet.“ (*Anonym* 1875.) Dies ist heute weiterhin gültig. Leider ist eine entsprechend enge Kooperation aber trotz guter Entwicklungen bisher noch nicht in allen Bereichen erreicht. Daher haben sich Human- und Veterinärmediziner zusammengefunden, um eine bessere Koordination entsprechender Aktivitäten und eine abgestimmte Zusammenarbeit zu erreichen. Viele Organisationen, wie z. B. die Weltgesundheitsorganisation WHO, die Weltorganisation für Tiergesundheit OIE und die Landwirtschafts- und Ernährungsorganisation der Vereinten Nationen FAO, unterstützen dies unter dem Slogan ‚One World, One Health, One Medicine‘. Im Besonderen werden dabei auch Aktivitäten gefördert, die eine Verbesserung der Infrastruktur im veterinär- und humanmedizinischen Bereich vieler Länder mit geringem bis mittlerem Einkommen zum Ziel haben.

Im nationalen Rahmen wurden Forschungsarbeiten an zoonotischen Erregern im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützten Nationalen Forschungsplattform für Zoonosen gebündelt. Der Plattform gehören derzeit etwa 500 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an, und es werden aktuell elf Forschungsverbünde gefördert. Derzeit ist jedoch noch unklar, in welchem Umfang es nach dem Auslaufen der Förderung im Jahr 2015 zu einer Verstetigung der nationalen Zusammenarbeit zur Erforschung von Zoonosen kommen kann. Möglich wäre eine Interaktion mit dem neu gegründeten Deutschen Zentrum für Infektionsforschung, das sich in Teilaspekten ebenfalls mit zoonotischen Infektionen beschäftigt.

5. Prävention von Zoonosen

In unseren Breiten lassen sich die häufigsten Zoonosen durch relativ einfache Maßnahmen der Lebensmittel- und Veterinärhygiene sowie der Biosicherheit vermeiden. Notwendig ist hierfür eine adäquate Information der Tierhalterinnen und Tierhalter bzw. der Verbraucherinnen und Verbraucher. Bei vektorübertragenen Infektionen spielt die Vektorkontrolle eine bedeutende Rolle, wobei nachhaltige Erfolge auch nur durch entsprechend intensive und nachhaltige Bekämpfungsverfahren erzielt werden können (KILPATRICK und RANDOLPH 2012). Problematisch ist, dass die verfügbaren Verfahren häufig nicht zielgerichtet gegen bestimmte Vektoren wirken, sondern ein breites Spektrum an Organismen erfassen, was Probleme mit der Umweltverträglichkeit mit sich bringt. Wo verfügbar, sollte daher unbedingt die Impfung gegen die Zoonoseerreger selbst eingesetzt werden. Große Erfolge bei der Bekämpfung von zoonotischen Infektionen wurden dadurch auch in Europa, z. B. in Österreich, seit Einführung des Impfstoffs zum Schutz des Menschen gegen die Frühsommer-Meningoenzephalitis, oder in vielen Ländern Mitteleuropas zur oralen Immunisierung der Füchse gegen Tollwut mit der Eradikation dieser Infektion in terrestrischen Tieren erzielt, so auch in Deutschland (Abb. 3).

Diese Erfahrungen zeigen, dass sich selbst Infektionen im Wildtierbereich bekämpfen lassen, was durch die globale Ausrottung der Rinderpest, einer nicht-zoonotischen Infektion von Rindern, eindrucksvoll unter Beweis gestellt wurde. Zumindest denkbar wäre ein ähnlicher Ansatz auch für die globale Eindämmung der Tollwut, die jährlich weltweit weiterhin ca. 50 000 Tote fordert und mehr als 2 000 000 Prophylaxen nach Exposition notwendig macht.

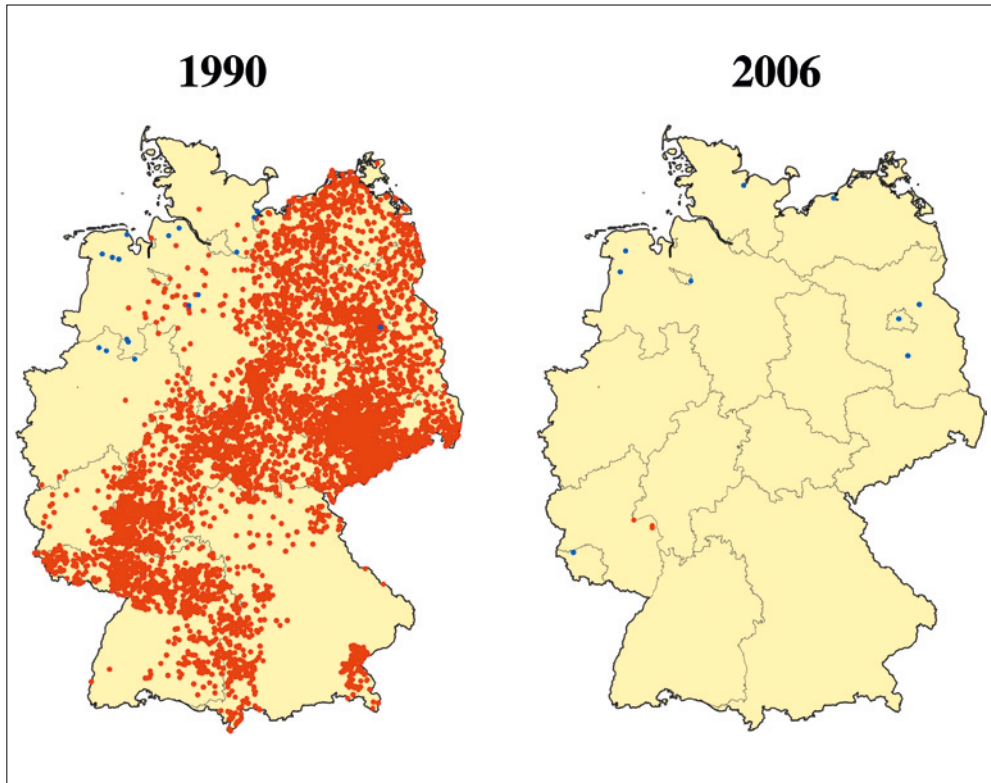


Abb. 3 Eradikation der Tollwut in Deutschland durch orale Immunisierung von Füchsen. Rote Punkte kennzeichnen Fälle von Fuchstollwut, blaue Punkte Fledermaustollwutfälle. Der letzte Fall von Fuchstollwut trat am 3. Februar 2006 auf. Seit 2008 ist Deutschland anerkannt frei von Tollwut bei terrestrischen Tieren.

Um Zoonosen erfolgreich bekämpfen zu können, ist die Entwicklung schneller Diagnosemethoden, neuartiger Impfstoffe, neuer Antiinfektiva und effizienter Managementpraktiken notwendig, um global eine Verbesserung der Situation zu erreichen. Große finanzielle und personelle Ressourcen werden derzeit in die Forschung über die Bekämpfung von Infektionen mit dem Humanen Immundefizienz-Virus (HIV), der hauptsächlich durch *Mycobacterium tuberculosis* hervorgerufenen Tuberkulose des Menschen und der vektorübertragenen Malaria investiert. Es wäre zu begrüßen, wenn ein substantieller Anteil an diesen Mitteln auch für die Linderung und Bekämpfung weniger schlagzeilenträchtiger, aber dennoch bedeutsamer anderer Infektionskrankheiten eingesetzt würde.

Dank

Ich danke Prof. Dr. F. J. CONRATHS für kritische Durchsicht und hilfreiche Kommentare.

Literatur

- Anonym*: Verhandlungen des preußischen Landtags vom 4. Juni 1875
- GRACE, D., MUTUA, F., OCHUNGO, P., KRUSKA, R., JONES, K., BRIERLEY, L., LAPAR, L., SAID, M., HERRERO, M., PHUC, P. D., THAO, N. B., AKUKU, I., and OGUTU, F.: Mapping of Poverty and likely Zoonoses Hotspots. Nairobi (Kenia): International Livestock Research Institute 2012
- HASNAIN, S. E., FRIEDRICH, B., METTENLEITER, T., DOBRINDT, U., and HACKER, J.: Climate change and infectious diseases – Impact of global warming and climate change on infectious diseases: Myth or reality? *Int. J. Med. Microbiol.* 302, 1–3 (2012)
- HOFFMANN, B., SCHEUCH, M., HÖPER, D., JUNGBLUT, R., HOLSTEG, M., SCHIRRMIEIER, H., ESCHBAUMER, M., GOLLER, K. V., WERNIKE, K., FISCHER, M., BREITHAUPT, A., METTENLEITER, T. C., and BEER M.: Novel orthobunyavirus in cattle, Europe, 2011. *Emerg. Infect. Dis.* 18, 469–472 (2012)
- JONES, K. E., PATEL, N. G., LEVY, M. A., STOREYGARD, A., BALK, D., GITTELMAN, J. L., and DASZAK, P.: Global trends in emerging infectious diseases. *Nature* 451, 990–993 (2008)
- KARESH, W. B., DOBSON, A., LLOYD-SMITH, J. O., LUBROTH, J., DIXON, M. A., BENNETT, M., ALDRICH, S., HARRINGTON, T., FORMENTY, P., LOH, E. H., MACHALABA, C. C., JASON, M. J., and HEYMANN, D. L.: Ecology of zoonoses: natural and unnatural histories. *Lancet* 380, 1936–1945 (2012)
- KILPATRICK, A. M., and RANDOLPH, S. E.: Drivers, dynamics and control of emerging vector-borne zoonotic diseases. *Lancet* 380, 1946–1955 (2012)
- KOCK, R., CROFT, S., DIXON, M., FLETCHER, C., GOOD, L., GUZMAN, J., HEYMANN, D., LIYANAGE, R., MCKEEVER, D., MCNERNEY, R., PEELING, R., MORAN, M., PFEIFFER, D., WAAGE, J., and WU, L.: DFID Zoonoses Report 6: prioritising the need for new diagnostics, medicine, vaccines and management practices of zoonoses which have significant impact in the developing world. (2012)
- TANNER, M., and ZINSSTAG, J.: ‚One Health‘ – the potential of closer collaboration between human and animal health. *Berl. Münch. Tierärztl. Wochenschr.* 122, 410–411 (2009)
- WERNER, D., KRONEFELD, M., SCHAFNER, F., and KAMPEN, H.: Two invasive mosquito species, *Aedes albopictus* and *Aedes japonicus japonicus*, trapped in south-west Germany, July to August 2011. *Eurosurveillance* 17/4, pii=20067

Prof. Dr. Dr. h. c. Thomas C. METTENLEITER
 Präsident
 Friedrich-Loeffler-Institut
 Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit
 Südufer 10
 17493 Greifswald – Insel Riems
 Bundesrepublik Deutschland
 Tel.: +49 38351 71250
 Fax: +49 38351 71151
 E-Mail: Thomas.Mettenleiter@ffi.bund.de
<http://www.ffi.bund.de>

Sicherung gesunder tierischer Nahrungsmittel

Karsten FEHLHABER ML (Leipzig) und Thomas ALTER (Berlin)

Mit 3 Abbildungen und 8 Tabellen



Zusammenfassung

Die derzeit in industrialisierten Ländern produzierten, vom Tier stammenden Lebensmittel bieten ein hohes Maß an Sicherheit. Große lebensmittelassoziierte Ausbrüche mit sehr schwerwiegenden Erkrankungen und seuchenhaftem Verlauf, wie sie noch vor wenigen Jahrzehnten an der Tagesordnung waren, sind zurückgedrängt worden. Dennoch verursachen allein Zoonosen, von denen die meisten oral-alimentär übertragen werden, in der EU Kosten von über 6 Mrd. Euro pro Jahr. Bei den bakteriell verursachten Lebensmittelinfektionen dominieren seit einigen Jahren *Campylobacter*-Infektionen. An zweiter Stelle folgen Salmonellosen, deren Inzidenz in Deutschland jedoch rückläufig ist.

In der Zukunft stellen sich neue Herausforderungen zur Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit, die sich u. a. aus dem demographischen Wandel (wachsender Anteil älterer Personen), der Änderung der Verzehrgewohnheiten (dem Trend zu Öko-Lebensmitteln und zu minimal prozessierten Produkten) und der Globalisierung von Warenströmen in der Lebensmittelwirtschaft ergeben. Ein Verzicht auf Lebensmittel, die vom Tier stammen, ist weltweit nicht zu erwarten.

Der Trend zu naturnahen, artgerechten Tierhaltungssystemen führt auch dazu, dass sich Infektionsketten wieder schließen können, die bei Tierhaltungssystemen in geschlossenen Ställen unterbrochen waren. So werden erhöhte *Toxoplasma gondii*-Seroprävalenzen in Schweinebeständen in Freilandhaltung beobachtet. Auch liegen Studien vor, die höhere *Campylobacter*- und *Salmonella*-Prävalenzen in Freilandgeflügelbeständen im Verhältnis zu konventionellen Tierhaltungssystemen belegen. Bereits jetzt ist sichtbar, dass die globale Erwärmung zur geographischen Ausbreitung von lebensmittelassoziierten Infektionserregern führen kann. Infektionen mit Vibriolen (insbesondere *Vibrio parahaemolyticus* und *V. vulnificus*) nehmen durch die Erwärmung der Meere zu.

Abstract

In industrialized countries, the foods of animal origin possess a high level of security. Large food-associated outbreaks with severe illnesses and epidemic courses, as they were encountered even a few decades ago, have been pushed back. Nevertheless, zoonotic agents, of which most are orally transferred *via* foods, cause cost of over 6 billion Euro per year in the EU. Since several years, *Campylobacter* are the primary source of foodborne bacterial illnesses in humans. In second place, *Salmonella* infections follow. But in Germany, the incidence of the latter is declining.

In the future, new challenges to ensure food security will be encountered. These challenges are associated with e. g. demographic changes (increasing proportion of older people), the changes in eating habits (the trend towards organic foods and minimally processed products) and the globalization of trade flows in the food industry. Worldwide, a decrease of consumption of foods of animal origin is not expected.

The trend to natural, animal welfare systems also means that infection chains can close again, that were disrupted in conventional animal husbandry systems in closed barns. For an example, increased *Toxoplasma gondii* seroprevalences in pig herds are observed in free-range farming. Also, several studies demonstrate the increased *Campylobacter* and *Salmonella* prevalences in free-range poultry flocks in relation to conventional farming systems. It is already clear that global warming will lead to the geographical spread of food-associated infectious agents. Infections with vibrios (*Vibrio parahaemolyticus* and *V. vulnificus* in particular) are increasing due to the warming of the oceans.

1. Einleitung

Nahrungsmittel (= Lebensmittel) stellen bis heute im Wesentlichen Produkte dar, die natürlichen, biologischen Ursprungs sind. Mitunter werden „natürliche“ Lebensmittel denen gegenübergestellt, die wegen ihres intensiven Verarbeitungsgrades und ihrer komplexen Zusammensetzung als „nicht natürlich“ und damit möglicher Weise als weniger gesund oder sogar gesundheitlich bedenklich bewertet werden, obwohl auch sie fast nur aus biologisch erzeugtem Material bestehen. Diese unwissenschaftliche Klassifizierung hat größtenteils ihre Ursache in der weit verbreiteten Unkenntnis über die Herstellung der Lebensmittel und ihre Zusammensetzung. Die meisten Lebensmittel sind also entweder tierischer oder pflanzlicher Herkunft bzw. sind Mischprodukte. Insbesondere bezogen auf die vom Tier stammenden Lebensmittel wird des Öfteren die Frage gestellt, ob wir sie denn morgen noch brauchen oder gar, ob wir sie denn morgen überhaupt noch wollen. Nicht zuletzt erwachsen solche Fragestellungen aus der in der Öffentlichkeit zunehmenden Beachtung ethischer Gesichtspunkte bei der Haltung, dem Transport und der Schlachtung der Tiere, die letztlich „Lieferanten“ von Lebensmitteln sind. Im Folgenden sollen deshalb – bevor auf das Problem der Lebensmittelsicherheit und die damit verbundenen künftigen Herausforderungen eingegangen wird – Aspekte der Bedeutung vom Tier stammender Lebensmittel herausgestellt werden.

2. Bedeutung vom Tier stammender Lebensmittel – heute und morgen

Als wichtiger Gradmesser für die Bedeutung einzelner Lebensmittelgruppen kann der Verbrauch herangezogen werden. So werden nach Angaben des Statistischen Jahrbuches (2012) bei den vom Tier stammenden Lebensmitteln folgende Verbrauchszahlen (kg pro Kopf und Jahr) in Deutschland erreicht: Fleisch 90, Eier 13, Fisch/Fischerzeugnisse 16 und Milch/Milcherzeugnisse 113. Der Fleischverbrauch stagniert seit einigen Jahren auf relativ hohem Niveau, wobei der Rindfleischanteil abnahm und der Geflügelfleischverbrauch leicht ansteigt. Der Verbrauch an Eiern ging seit 1992 kontinuierlich zurück und hat sich in den letzten Jahren auf etwa gleichem Niveau gehalten. Bei Fisch und Fischerzeugnissen, einschließlich Krebsen und Muscheln, gibt es eine zunehmende Verbrauchstendenz, ebenso bei Milcherzeugnissen. Die Verbrauchszahlen pflanzlicher Lebensmittel übertreffen in der Summe traditionell die der tierischen Produkte. Sie liegen z. B. für Gemüse/Kartoffeln bei > 150, für Obst bei etwa 125 und für Getreideerzeugnisse bei etwa 80. Dennoch kann festgestellt werden, dass die vom Tier stammenden Lebensmittel heute (immer noch) eine immense Rolle in der Ernährung spielen.

Aus globaler Sicht lässt sich seit Jahren eine sehr deutliche Zunahme der Fleischproduktion konstatieren (WINDHORST 2012, Tab. 1). In den zehn Jahren von 2000 bis 2009 ist sie um 21,9% angewachsen. Betrachtet man den Anteil der Kontinente z. B. an der Steigerung der Schweinefleischproduktion in den Jahren von 1990 bis 2009, so wird deutlich, dass ein überproportionales Wachstum vor allem in Asien, Afrika sowie Zentral- und Südamerika stattfindet. Der Anteil Europas ist dabei gesunken (WINDHORST 2011, Tab. 2).

Tab. 1 Zunahme der globalen Fleischproduktion zwischen 2000 und 2009 (WINDHORST 2012)

Fleisch	Zunahme der Fleischproduktion in %
Geflügelfleisch	34,9
Schweinefleisch	18,4
Rindfleisch	11,7
Gesamt	21,9

Tab. 2 Veränderung der Anteile der Kontinente an der globalen Schweinefleischproduktion zwischen 1990 und 2009 (WINDHORST 2011)

Region	Änderung der Anteile in %
Afrika	98,6
Asien	100,7
Europa	-8,2
Nordamerika	53,2
Zentral- und Südamerika	137,5

Nach Angaben der FAO (*FAOSTAT* 2012) wird die Fleischproduktion mittelfristig weiterhin erheblich ansteigen (Abb. 1). Hierbei werden auch künftig die Schwellen- und Entwicklungsländer das Tempo bestimmen, verursacht durch die Zunahme der Bevölkerung und die Steigerung der durchschnittlichen Einkommen der Menschen, die den „Luxus“ des Fleischverzehrs als Teil des gestiegenen Lebensniveaus verständlicherweise in Anspruch nehmen. In vielen dieser Länder gab es in der Vergangenheit eine absolute Unterversorgung mit dem Proteinlieferanten Fleisch. Vor diesem Hintergrund wird es nach Einschätzung des Wissenschaftlichen Beirates des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (*BMELV* 2012) weltweit eine Zunahme der Erzeugung tierischer Nahrungsmittel (vor allem Fleisch, aber nicht nur) im Zeitraum von 2000 bis 2030 um über 60% geben. In diesem Zeitraum ist es sehr unwahrscheinlich, dass Fleisch durch ein synthetisches Produkt – etwa durch Züchtung von Muskelzellen aus Stammzellen im Labor – mit denselben oder ähnlichen ernährungsphysiologischen und sensorischen Eigenschaften abgelöst werden kann.

Aus der Sicht des Umwelt- und Ressourcenschutzes wird die Steigerung der Fleisch-erzeugung wegen des hohen Trinkwasserverbrauchs der Tierhaltung und des großen Futterflächenbedarfes (ca. 70% der landwirtschaftlichen Nutzfläche) zunehmend kritisch gesehen. Durch die Verknappung der landwirtschaftlichen Nutzfläche ist eine Teuerung der Produktion pflanzlicher Lebensmittel möglicherweise zu erwarten. Auf diese Problematik soll hier nicht näher eingegangen werden. Alles in allem aber weisen die wenigen Zahlen auch für die kommenden Jahre die Relevanz der vom Tier stammenden Lebensmittel aus, eine Tatsache, die bei der Bewertung der Sicherheit unserer Lebensmittel besonders berücksichtigt werden muss. So sind die vom Tier stammenden Lebensmittel viel häufiger die Ursache von Lebensmittelinfektionen des Menschen als pflanzliche.

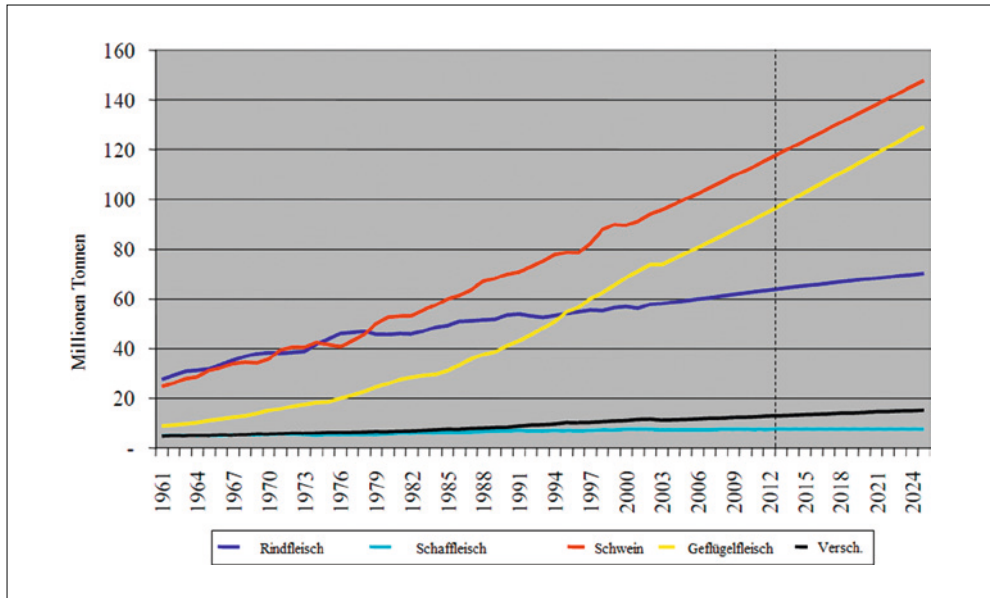


Abb. 1 Entwicklung der Fleischproduktion weltweit (nach FAOSTAT 2012)

Während Tieren und Menschen etliche Erreger als potentielle Krankheitserreger gemeinsam sind (Zoonoseerreger), verursachen auf Pflanzen spezialisierte Keime sehr selten Erkrankungen bei Mensch und Tier. Dennoch können von pflanzlichen Lebensmitteln durchaus bedeutende Krankheitsausbrüche beim Menschen ausgehen, nämlich dann, wenn die Pflanzen durch Keime, die vom Tier, vom Menschen oder aus der verschmutzten Umwelt stammen, kontaminiert wurden. Aktuellstes Beispiel ist der EHEC-Ausbruch¹ im Jahre 2011 in Deutschland, der von kontaminierten Bockshornkleesamen ausging.

Eine weitere Hygieneproblematik ergibt sich aus dem globalen Handel mit Lebensmitteln, der auch im Bereich der tierischen Produkte heute eine große Rolle spielt. Durch Entwicklung einer perfekten Kühl- und Gefriertechnik im Verlaufe der vergangenen Jahrzehnte gibt es kein Hindernis mehr für lange Transporte empfindlicher, leicht verderblicher Güter wie z. B. für Fleisch. Derartige Warenströme rund um den Globus nehmen gewaltig zu. Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Herkunft, Herstellung und Zusammensetzung der Produkte sind natürlich schwerer zu gewährleisten als bei inländischen oder regionalen Erzeugnissen. Eine vollständige Selbstversorgung mit Lebensmitteln aller Art ist heute nicht mehr möglich. In Deutschland betrug z. B. der Selbstversorgungsgrad im Jahre 2010 mit Obst 22 %, mit Gemüse 39 %, mit Fisch 21 % und mit Eiern 58 %. Bei Fleisch, Getreide und Milcherzeugnissen lag er über 100 % (BMELV 2012), aber selbst bei letztgenannten Lebensmitteln gibt es, bedingt durch den internationalen Handel, nicht nur deutsche Produkte auf dem Markt, sondern auch Importe aus vielen Teilen Europas und der Welt.

¹ EHEC – Enterohämorrhagische *Escherichia coli*.

3. Lebensmittelsicherheit – wo stehen wir?

Durch Lebensmittel verursachte Gesundheitsprobleme stellen sich in den Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern grundsätzlich unterschiedlich dar. In den armen Zonen der Erde sterben jährlich ca. 5 Mio. Kinder an Darmerkrankungen, die durchschnittliche Lebenserwartung liegt noch heute in manchen Regionen unter 35 Jahren, und über eine Milliarde Menschen leiden weltweit unter Hunger und Unterernährung. Über 80% ihres geringen Einkommens müssen sie für Nahrungsmittel ausgeben. In krassem Gegensatz steht dazu das Phänomen einer moralisch äußerst bedenklichen Lebensmittelverschwendung in den reichen Ländern. In Deutschland werden nach Angaben des Instituts für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft Stuttgart (2012) durchschnittlich pro Jahr und Person Lebensmittel im Wert von 235 Euro weggeworfen.

Die Lebensmittelsicherheit hat sich in den Industrieländern sehr positiv entwickelt; sie ist heute entscheidend besser als noch vor 40 bis 50 Jahren. Schwerwiegende, mit Todesfällen verbundene, seuchenhaft auftretende Lebensmittelinfektionen stellen gegenwärtig die Ausnahme dar. Die Lebensmittel sind heute so sicher wie nie zuvor. Wenn die Lebenserwartung der Menschen seit Jahren zunimmt, kann dies u. a. sicherlich auch auf eine gesunde Ernährung zurückzuführen sein. Es bedarf jedoch permanenter Anstrengung, dieses Niveau aufrechtzuerhalten. Das betrifft sowohl die materiell-technische Sicherstellung der Hygiene in der gesamten Nahrungskette als auch das sachgerechte, qualifizierte Handeln der im Lebensmittelverkehr Tätigen, bis hin zum Verbraucher selbst. Nachlässigkeiten bei der Hygienesicherung können deshalb auch heute noch in Einzelfällen durchaus dramatische Folgen für die Verbrauchergesundheit nach sich ziehen. Nachgewiesenermaßen sind Verstöße gegen lange bekannte Grundsätze der Lebensmittelhygiene die häufigsten Auslöser von Lebensmittelinfektionen. Dies ist einer der wichtigsten Gründe dafür, dass nach der Statistik die Anzahl gemeldeter Darminfektionen, von denen schätzungsweise 60% Lebensmittelinfektionen sind, seit Jahren hoch ist und zur Zeit kein Trend des Zurückdrängens erkennbar ist.

In der Bevölkerung ist im Gegensatz dazu die Meinung, die Lebensmittel seien nicht sicher genug, weit verbreitet. Wenn auch die Sicherheit der Lebensmittel so hoch wie nie zuvor ist, so kann andererseits doch festgestellt werden, dass sich die Ansprüche der Verbraucher an die Sicherheit weiter entwickeln und sicherlich ebenfalls noch nie so hoch wie heute waren. Das mentale Sicherheitsbedürfnis (alles sollte möglichst 100%ig risikofrei sein) trägt mitunter den Kern des Unerfüllbaren in sich und macht es der Lebensmittelbranche und der Politik schwer, Teile der Verbraucherschaft wirklich zufriedenzustellen. Hier gibt es ein Kommunikationsproblem, dem nur durch eine Objektivierung der Risikodarstellung und Entwicklung einer realistischen Risikowahrnehmung entgegenge wirkt werden kann. Aber Risiken werden gerade beim Lebensmittelthema schnell aufgebauscht, hier wird oft vorschnell und emotional geurteilt. Beispielsweise werden lebensmittlassoziierte „Skandale“ bzw. Negativereignisse meist *a priori* als Bedrohung der gesundheitlichen Sicherheit wahrgenommen, auch wenn das nicht zutrifft. Eine von MOHS (2011) durchgeführte Analyse von Lebensmittel-„Skandalen“ der letzten 40 Jahre ergab, dass nur 9,5% der ausgewerteten Ereignisse tatsächlich mit Erkrankungs- bzw. Todesfällen der Verbraucher im Zusammenhang standen. In Tabelle 3 sind einige dieser Geschehnisse beispielhaft aufgeführt.

Tab. 3 Lebensmittelassoziierte Katastrophen/„Skandale“/Negativereignisse

Jahr	Ereignis	Gesundheitliche Folgen
1974–1978	X-Disease, Irak, Hg-Vergiftung	60 000 akut und chronisch Erkrankte
1980er Jahre	Hormonkälberskandale, Europa	–
1981–1984	Vergiftung durch techn. Öle in Speiseölen, Spanien	6000 Tote, 140 000 Erkrankte
1985–1986	Flüssigei-Skandal (Nudeln), Deutschland	–
1986	Reaktorbrand, Tschernobyl	? Tote; ? Erkrankte
1987	Nematodenskandal (Heringe), Deutschland	–
1991	Cholera-Epidemie, Peru	1700 Tote, > 170 000 Erkrankte
1992	Salmonellose, Deutschland	165 Tote, 200 000 Erkrankte
2000	BSE-Skandal, Deutschland	–
2005/2006	„Gammelfleisch“-Skandal	–
2009	Lebensmittelimite im Handel, z. B. „Analog“-Käse	–
2011	EHEC-Ausbruch, Deutschland	50 Tote, 4400 Erkrankte

Am Beispiel der Versorgung mit dem Lebensmittel Fleisch lässt sich die Entwicklung der Ansprüche an die Verbrauchersicherheit gut aufzeigen. Während in den Nachkriegsjahren das Freisein der zur Fleischgewinnung dienenden Tiere von Tierseuchen und Krankheiten sowie das Nichtvorhandensein von pathologisch-anatomischen Veränderungen des Fleisches die Hauptkriterien waren, kam in den 1970er Jahren die Forderung nach Freiheit von Rückständen und chemischen Kontaminanten hinzu. Seit den 1980er Jahren wird stärker gefordert, dass auch bei gesunden Tieren zoonotische Keime nicht vorhanden sein sollen. Heute beinhalten die Anforderungen zusätzlich Aspekte des Tierschutzes bei Haltung, Transport und Schlachtung, nachhaltiges Wirtschaften, Regionalität, Transparenz usw. Seit der BSE-Krise² wurde seitens der Verbraucherschutzpolitik auch der umfassende Schutz vor Risiken, die als solche noch gar nicht wissenschaftlich erwiesen sind, als rechtlich legitim akzeptiert und zu einem Verbraucherschutzprinzip erhoben.

Die Verbraucherschutzproblematik erlangte gegen Ende der 1990er Jahre mit der BSE-Krise eine bis dahin nicht für möglich gehaltene völlig neue Dimension. Sie wurde zu einem Thema von höchster politischer Brisanz. Die Europäische Union (EU) erklärte den gesundheitlichen Verbraucherschutz zu einer zentralen Zielstellung. In der Öffentlichkeit wurde eine Krise des Verbraucherschutzes ausgemacht. Legt man jedoch den Maßstab des Auftretens gesundheitlicher Probleme beim Menschen an, so war diese „Krise“ keineswegs wirklich existent. Dennoch resultierte daraus ein Verlust des Vertrauens in die Lebensmittelsicherheit (FEHLHABER 2007). Aber auch Krisen und „Skandale“, deren gesundheitliche Bedeutung weit überschätzt oder gar fehlbewertet wurden, trugen letztlich dazu bei, dem Verbraucherschutz in Politik und Verwaltung einen höheren Stellenwert zuzuordnen, was sich insbesondere in der BSE-Krise in der Etablierung wirksamerer Rechtssetzung im Lebensmittelhygienerecht sowohl auf EU- als auch auf nationaler Ebene ausdrückte und insofern einen Beitrag zur Stärkung der Lebensmittelüberwachung und Verbrauchersicherheit darstellte.

2 BSE – Bovine Spongiforme Enzephalopathie.

Dazu zählen:

- Maßnahmen zur Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit werden in der gesamten Kette der Lebensmittelerzeugung („from farm to fork“, „from stable to table“) gefordert.
- Das Lebensmittelhygienerecht wurde in der EU harmonisiert.
- Die Lebensmittelunternehmer tragen die Verantwortung für die Lebensmittelsicherheit; sie werden zu verstärkter Eigenkontrolle verpflichtet.
- Die oft komplizierten Warenströme sowie die Herstellung und Zusammensetzung der Produkte sollen transparent und zurückverfolgbar sein.
- Entstehende Risiken sollen der Verbraucherschaft gegenüber rasch und wissenschaftlich kompetent kommuniziert werden (FEHLHABER 2009).

Bis heute ist die Meinung weit verbreitet, die Lebensmittelsicherheit ließe sich durch den Übergang von der auf Effizienz, Technik und Großproduktion ausgelegten Landwirtschaft hin zum ökologischen Landbau verbessern, Ökoprodukte seien grundsätzlich sicherer als konventionell erzeugte. Bezogen auf die vom Tier stammenden Produkte lässt sich diese Ansicht nicht belegen. Es gibt im Gegenteil etliche Hinweise dafür, dass größere Risiken gerade bei bestimmten Ökoprodukten zu erwarten sind. In eigenen Untersuchungen konnte beispielsweise ein höheres Maß an Toxoplasmose-Infektionen bei Schweinen aus der Ökohaltung im Vergleich mit konventionell gehaltenen gefunden werden (Tab. 4, DE BUHR et al. 2008). Diese Erreger können über das Fleisch auf den Menschen übertragen werden.

Tab. 4 *Toxoplasma*-Seroprävalenzen bei Schweinen in Abhängigkeit von der Tierkategorie

Tierkategorie	n	Seroprävalenzen absolut	Seroprävalenzen in Prozent
Mastschweine	4721	183	3,88
Outdoorschweine	180	5	2,78
Ökoschweine	60	7	11,67
Altsauen	38	12	31,58

Ein Vergleich des Gesundheitszustandes von ökologisch und konventionell gehaltenen Mastputen ergab nach Untersuchung der geschlachteten Tiere einen höheren Anteil als untauglich zu beurteilender Tierkörper bzw. Tierkörperteile bei den Ökotieren. In dieser Untersuchung zeigten sich demzufolge keine Vorteile der Ökohaltung in Bezug auf die Lebensmittelsicherheit und auf den Gesundheitszustand als Ausdruck einer tierschutzgerechteren Haltung, sondern eher Nachteile (ERMAKOW und FEHLHABER 2012).

Abgesehen von dem Aspekt der Lebensmittelsicherheit ist die Öko-Erzeugung aus globaler Sicht angesichts des stark steigenden Bedarfs an tierischen Produkten ohnehin kein Weg dazu, das weltweite Nahrungsmittelproblem zu lösen. Trotz jährlicher Steigerungsraten und zunehmender Popularität in der Bevölkerung liegt der Anteil an sogenannten Bioprodukten an der Gesamterzeugung u. a. auch in Deutschland niedrig (Tab. 5).

Tab. 5 Anteil ökologischer Landbau und Bioprodukte in Deutschland 2010 (*Statistisches Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2011*)

Bereich	Anteil der ökologischen Landwirtschaft
Ökobetriebe	5,5%
Ökologisch landwirtschaftlich genutzte Fläche	5,6%
Rindfleisch	4,3%
Schweinefleisch	0,4%
Geflügelfleisch	0,7%
Eier	6,9%
Milch	ca. 2,0%
Gemüse	ca. 8,0%
Obst	ca. 6,0%

Bei der Bewertung der Lebensmittelsicherheit muss insbesondere auf die Lebensmittelinfektionen sowie auf das Vorkommen von Rückständen und chemischen Kontaminanten in Lebensmitteln eingegangen werden. Die immensen Gesundheitsschädigungen, die durch falsche Ernährung zustande kommen, wie z. B. Herz- und Kreislauferkrankungen oder Diabetes, sind kein Problem der Lebensmittelsicherheit, sondern eine Frage der Ernährungshygiene. Auf sie wird deshalb hier nicht weiter eingegangen.

Die bundesweiten Ergebnisse der *Rückstands- und Kontaminantenuntersuchungen* weisen aus, dass es in den vergangenen 20 Jahren zu erheblichen Verbesserungen gekommen ist, so dass die gegenwärtige Situation durch eine insgesamt geringe Belastung der Lebensmittel charakterisiert ist. Im Jahre 2010 beispielsweise lag der Anteil von Proben, die Pestizidrückstände über der zulässigen Höchstgrenze enthielten, bei den Lebensmitteln tierischen Ursprungs mit 0,3% deutlich unter denen pflanzlicher Herkunft. Aber auch letztere erreichten keine besorgniserregende Größenordnung (Tab. 6, *Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2011*). Der Anteil von Proben mit unzulässigen Tierarzneimittelrückständen ist bei den wichtigsten Schlachttierarten als sehr gering einzustufen.

Tab. 6 Ergebnisse von Rückstandsuntersuchungen in Deutschland 2010 – Beispiele – (*BVL 2011*)

Anteil Proben mit Pestizidrückständen über der zugelassenen Höchstmenge	
Matrix	Anteil
Getreide	3,8%
Lebensmittel tierischen Ursprungs	0,3%
Obst/Gemüse	2,9%
Anteil Proben mit unzulässigen Tierarzneimittelrückständen	
Matrix	Anteil
Rind	0,03%
Schwein	0,05%
Geflügel	0,09%

Diese Feststellungen stehen in diametralem Gegensatz zu den weit verbreiteten Meinungen, unsere Lebensmittel seien „voller Gift“, und es stelle sich die Frage, „was man denn überhaupt noch essen könne“. Ungeachtet der günstigen Situation ist natürlich als Folge von Rechtsverstößen oder durch mangelhafte Sorgfalt stets mit Ereignissen zu rechnen, bei denen Rückstände bzw. Kontaminanten in die Nahrungskette gelangen und nachgewiesen werden. Ein engmaschiges Netz von Rechtsvorschriften und umfangreiche prophylaktische Untersuchungen werden demzufolge auch künftig für die erforderliche Sicherheit sorgen müssen.

Das wichtigste von Lebensmitteln verursachte Gesundheitsproblem ist das Auftreten einer nach wie vor hohen Anzahl an *Lebensmittelinfektionen*. Dabei spielen die Mikroorganismen eine herausragende Rolle. Durch Parasiten bedingte Lebensmittelinfektionen haben zwar gegenüber früheren Zeiten an Bedeutung verloren, dennoch gilt es, einigen Parasitosen auch heute noch hohe Aufmerksamkeit zu widmen. Auf die drei wichtigsten soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

- *Toxoplasmose*: Diese Erkrankung wird vorrangig durch den Verzehr unerhitzten Schweinefleisches übertragen. Auch Produkte aus Schweinefleisch, die nicht thermisch behandelt werden (z. B. wenig gereifte Rohwurst), können noch den infektiösen Erreger *Toxoplasma gondii* enthalten. Durch veränderte Tierhaltungsbedingungen (naturnahe, tiergerechte Haltungsformen) ist es in den letzten Jahren zu einer stärkeren Verbreitung des Parasiten in Schweinebeständen gekommen (DE BUHR et al. 2008, BLAHA et al. 2011). Da nur kongenital entstandene Toxoplasmosen des Menschen meldepflichtig sind, ist die Zahl der oral-alimentär verursachten Toxoplasmosen nicht bekannt.
- *Cysticercose*: Durch Rohverzehr von Rindfleisch (z. B. Tartar, nicht durchgegarnte Steaks) besteht auch heute noch die Gefahr einer Infektion durch Rinderfinnen (*Cysticercus bovis*) mit der Folge der Entwicklung des Rinderfinnenbandwurms (*Taenia saginata*). Obwohl der Erreger stark zurückgedrängt werden konnte, besteht dadurch, dass er noch bei ca. 0,5% der geschlachteten Rinder vorkommt und bei der Fleischuntersuchung nicht in jedem Falle gesehen werden kann, eine Restinzidenz, die in Deutschland zu schätzungsweise mehreren Tausend Bandwurmträgern pro Jahr führt. Offizielle Fallzahlen liegen nicht vor, da es auch hier keine Meldepflicht gibt.
- *Trichinellen* („Trichinen“): Trotz des nur noch sehr seltenen Vorkommens von *Trichinella spiralis* bei den Mastschweinen in Mitteleuropa steht man heute auf dem Standpunkt, dass die aufwendige Untersuchung jeden Schlachtschweines (und der Wildschweine) auf Trichinellen wegen des globalen Handels mit Schweinefleisch weiterhin unverzichtbar sei. Des Weiteren gibt es immer wieder einzelne Erkrankungen, die meist durch schwere Krankheitsbilder charakterisiert sind.

Die überwiegende Anzahl an Lebensmittelinfektionen wird durch *Bakterien und Viren* verursacht. Tabelle 7 enthält die Angaben zu gemeldeten Enteritis-infectiosa-Fällen aus den Jahren 2004 bis 2009. Darunter befinden sich vorrangig über Lebensmittel verbreitete Erkrankungen. Die Erkrankungszahlen für die vier häufigsten Ursachen, die über 90% aller gemeldeten Fälle ausmachen, sind für die Jahre 2010 und 2011 in Tabelle 8 erfasst.

Tab. 7 Gemeldete Fälle infektiöser Darmerkrankungen – Deutschland 2004 bis 2009 (RKI 2004–2010)

Erkrankung	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Salmonellose	56 976	52 245	52 319	55 400	42 789	31 397
Rotavirus-Enteritis	37 789	54 240	66 800	59 346	77 336	62 207
Campylobacteriose	55 796	62 114	51 764	66 107	64 334	62 789
Norovirus-Enteritis	64 973	62 619	74 445	201 133	211 247	178 638
Yersiniose	6 184	5 624	5 135	4 987	4 344	3 731
Shigellosen	1 151	1 168	814	867	574	617
Hepatitis A	1 938	1 217	1 221	937	1 064	929
Cryptosporidiose	936	1 309	1 194	1 459	1 010	1 014
Typhus/Paratyphus	189	136	136	59	86	76
Botulismus	6	24	7	9	10	5
EHEC-Infektion	925	1 162	1 197	839	838	835
Trichinellose	5	0	22	10	15	1
Tuberculose	6 549	6 057	5 372	5 027	4 576	4 432
Summe	233 677	247 915	260 403	397 180	408 223	346 671

Tab. 8 Die vier häufigsten Ursachen gemeldeter Enteritis-infectiosa-Fälle und ihr Anteil an der Gesamtzahl gemeldeter Fälle (RKI 2012)

Erreger	2010	2011
<i>Campylobacter</i>	65 741	71 307
<i>Salmonella</i>	25 370	24 512
Norovirus	140 517	116 109
Rotavirus	54 052	54 444
Summe	285 660	266 372
Anteil an Gesamtzahl	94,8%	92,2%

Es zeigt sich, dass die Salmonellose und Campylobacteriose die wichtigsten bakteriell verursachten Erkrankungen darstellen. In beiden Fällen handelt es sich um Zoonosen, d. h. um Erkrankungen, die wechselseitig vom Tier auf den Menschen übertragbar sind. Die Erreger gelangen aus den Tierbeständen bei der Gewinnung der Lebensmittel (Schlachtung, Verarbeitung) in die Nahrungskette des Menschen. Während die Zahl der Salmonellosen als der klassischen Form von „Lebensmittelvergiftungen“ in den letzten Jahren reduziert werden konnte, sind die Fallzahlen an Campylobacteriosen unvermindert hoch (Abb. 2).

Eine wichtige Ursache für die Verminderung der Salmonellose-Fälle ist in der erfolgreichen Zurückdrängung der Salmonellen aus den Geflügelbeständen mit der Folge des verminderten Vorkommens im Geflügelfleisch und bei Eiern zu sehen. Wenn auch die Anzahl der Campylobacteriose-Fälle die Anzahl an Salmonellosen in den letzten Jahren deutlich

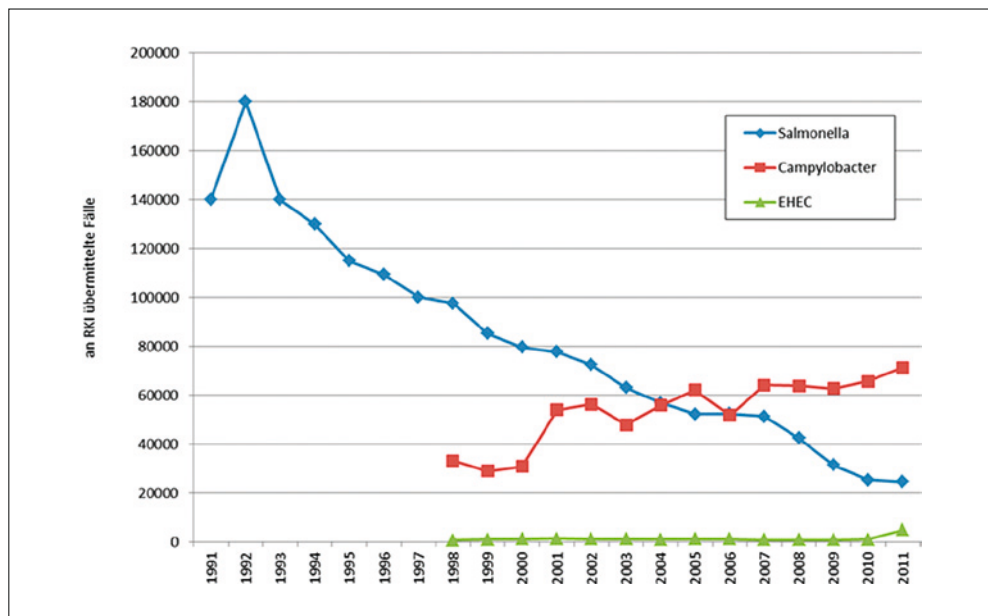


Abb. 2 Erkrankungsfälle in Deutschland 1991 bis 2011 (nach RKI 2012, SurvStat)

übersteigt, so darf bei der Bewertung der Geschehen nicht vergessen werden, dass die Salmonellose eine ausgeprägtere Tendenz zur Ausbreitung auf verschiedenen Routen besitzt (z. B. erkrankte Person zu Gesunden) und damit stets eine weitere Verbreitung nach Auftreten eines Ausbruches befürchtet werden muss, was strenge antiepidemische Maßnahmen erfordert. Auch die im Vergleich zu Salmonellen wesentlich geringere Tenazität der *Campylobacter*-Keime in der Umwelt und ihr Unvermögen, sich bei Temperaturen unter 30 °C in Lebensmitteln anzureichern, tragen zu diesem Unterschied bei. Die mit *Campylobacter* kontaminierten Lebensmittel (z. B. Geflügelfleisch, Rohmilch) sind dennoch hoch infektiös, weil bereits eine geringe minimale Infektionsdosis von wenigen Hundert Keimen die Erkrankung auszulösen vermag.

Neben diesen beiden bakteriellen Erregern spielt eine Reihe weiterer Bakterien eine Rolle, die im Allgemeinen geringere jährliche Erkrankungsziffern aufweisen, aber im Einzelfall zu schwerwiegenden Krankheitsbildern führen können, z. B. die Listeriose, die Yersiniose, Shigellosen oder der Botulismus. Aber auch größere Ausbrüche sind unter ungünstigen Bedingungen möglich, wie der EHEC-Ausbruch in Deutschland im Jahre 2011, der mit 53 Todesfällen und über 3000 Erkrankten einherging. Trotz intensiver Bemühungen konnte die Infektionsquelle erst nach mehreren Wochen aufgeklärt und der umfangreiche Ausbruch deshalb erst relativ spät eingedämmt werden.

Weiterhin wird in den Tabellen 7 und 8 der erhebliche Anstieg der durch Rota- und Noroviren bedingten Enteritiden deutlich. Inwiefern die Rotaviren über Lebensmittel verbreitet werden, ist noch unklar. Noroviren hingegen können des Öfteren über kontaminierte Lebensmittel verbreitet werden (ca. 20 bis 40% der Fälle), sie führen nicht selten auch zu Erkrankungsausbrüchen mit einer hohen Anzahl Betroffener. Der steile Anstieg diagnostizierter Norovirusinfektionen im Zusammenhang mit dem Lebensmit-

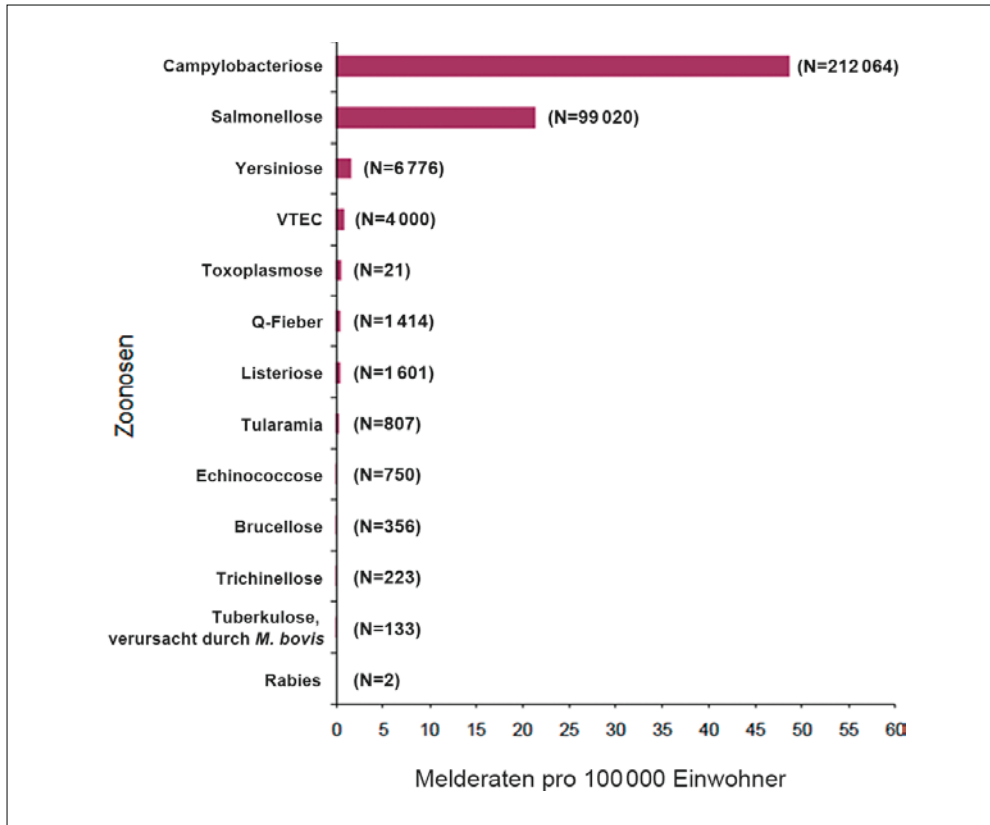


Abb. 3 Humaninfektionen durch Zoonosen in der EU 2010 (EFSA 2012)

telverzehr in den letzten Jahren dürfte zum großen Teil aber auch auf die verbesserten Routine-Untersuchungsmethoden, insbesondere die PCR-Technik, zurückzuführen sein.

Die große Bedeutung der durch Zoonosen vermittelten Humaninfektionen im EU-Raum zeigt die Abbildung 3. Die meisten Infektionen, die Zoonosen sind, werden auch im europäischen Maßstab von *Campylobacter* und *Salmonella* ausgelöst (EFSA 2012).

4. Herausforderungen bei der künftigen Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit

Eine vorrangige Aufgabe besteht bei der Zurückdrängung der Lebensmittelinfektionen in der *Bekämpfung der Zoonosen*. Mit der Verdrängung der Erreger aus den Tierbeständen würde eine wichtige Eintragsquelle in die Nahrungskette reduziert bzw. eliminiert werden. Dabei kann die vorgeschriebene makroskopische Fleischuntersuchung auf dem Schlachthof keinen Beitrag leisten, denn die Erreger, insbesondere geht es um die erwähnten Salmonellen und *Campylobacter*-Keime, führen in der Regel nicht zur Erkrankung der Tiere, so dass es keinen Anlass für eine Beanstandung am Schlachtband gibt. Die Schlachttiere erscheinen gesund; sie sind aber symptomlose Träger der Zoonoseerreger.

In der Salmonellen-Bekämpfung liegen hier erste Ergebnisse vor, die auf der Durchführung von Monitorings zur Erfassung des Erregervorkommens und unter anderem auf Maßnahmen zur Verhinderung des Erregereintrags aus der Umwelt in die Tierbestände, auf Impfprogrammen und auf der Durchsetzung einer guten Stall- und Futtermittelhygiene basieren. Solche Bekämpfungsprogramme sind im Allgemeinen sehr kostenintensiv. Sie können deshalb nicht auf alle in Frage kommenden Zoonoseerreger ausgerichtet werden, sondern nur auf die Schwerpunkte. Die Eliminierung von *Campylobacter* aus den Tierbeständen erscheint ungleich schwieriger, da diese Erreger insbesondere in den Geflügelbeständen noch viel verbreiteter vorkommen als Salmonellen. Mit der Präsenz dieser Keime im Geflügelfleisch muss also noch auf längere Sicht gerechnet werden. Hier besteht die wichtigste Verbraucherschutzmaßnahme im hygienischen Umgang mit dem Fleisch und vor allem einem ausreichenden Durchgaren bei der Zubereitung. Dies ist ein Grundsatz, der natürlich auch auf die Übertragung anderer Erreger über das Fleisch gerichtet ist.

Da in der Tierhaltung dem Tierwohl zu Recht eine verstärkte Aufmerksamkeit zukommt, werden herkömmliche, industriemäßige massenhafte Tierhaltungen mehr und mehr in Frage gestellt. Der Trend geht in Richtung auf tierfreundliche, naturnahe Haltungsformen. Diese gehen aber nicht immer mit einer Verbesserung der Sicherheit der von ihnen gewonnenen Produkte einher, denn durch die „offenen“ Haltungssysteme sind die Tiere weniger von der Umwelt abgeschirmt, so dass sich Infektketten leichter schließen und eine Sanierung von bestimmten Erregern erschwert wird. Untersuchungen zeigen, dass z. B. mit einem höheren *Campylobacter*-Vorkommen in Freiland-Geflügelhaltungen zu rechnen ist. Nach den Ergebnissen von HEUER et al. (2001) waren 100% der untersuchten Geflügelherden mit Ökohaltung *Campylobacter*-positiv, während sich nur 37% der konventionellen Herden als positiv erwiesen. Auf das Toxoplasma-Beispiel wurde weiter vorn bereits eingegangen. Aus diesem Spannungsfeld unterschiedlicher Anforderungen von Tierschutz und Verbraucherschutz werden sich in der Zukunft schwieriger werdende Aufgaben bei der Zoonosebekämpfung ergeben.

Die Haltung von Nutztieren, die der Lebensmittelgewinnung dienen, wird aber auch künftig in einer gewissen Konzentration erfolgen müssen, denn der massenhafte Bedarf an tierischen Lebensmitteln kann nicht von einer Tierhaltung in kleinsten Einheiten gedeckt werden, wenn sie auch möglicherweise am tierfreundlichsten ist. Für eine ausschließlich extensive Tierhaltung fehlt zudem die dafür erforderliche landwirtschaftliche Nutzfläche. Wichtiger Maßstab für die Eignung einer Haltungsform dürfte die *Tiergesundheit* sein. Für die Bemessung des Tierschutzes kann bzw. muss als Maßstab also der Grad der Tiergesundheit herangezogen werden. Es gilt demzufolge, künftig nach vertretbaren Kompromissen zu suchen, die nicht nur dem Tierwohl und der Lebensmittelsicherheit, sondern auch dem bedarfsgerechten Aufkommen an Erzeugnissen entsprechen.

Geht eine hohe Tierkonzentration mit Fehlern im Tierhaltungsmanagement einher, kann es rasch zu Erkrankungen im Tierbestand kommen, die eine tierärztliche Behandlung erforderlich machen. In vielen Fällen müssen Kontakttiere bzw. der ganze Bestand antibiotisch mitbehandelt werden, um die Erkrankung mit Erfolg zu bekämpfen. Dieser Medikamenteneinsatz ist auch aus Sicht des Tierschutzgedankens erforderlich (Schmerzen und Leiden der Tiere dürfen nicht geduldet werden). Der Antibiotikaeinsatz erfolgt so, dass zum Schlachtzeitpunkt keine Rückstände mehr im Fleisch vorhanden sind. Diese seit Jahrzehnten bereits bestehende, auch rechtlich verankerte Forderung wird – wie Kontrollen ergeben – sehr zuverlässig eingehalten. Allerdings fördert der allzu häufige Anti-

biotikaeinsatz die *Resistenzbildung* von Mikroorganismen im Tierbestand. Die resistenten Keime können dann über die zu gewinnenden Lebensmittel zum Menschen gelangen und hier unter Umständen zu großen Therapieproblemen führen. Die vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR 2011) jährlich durchgeführten Monitorings erfassen u. a. die wichtigen Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA) und „Extended Spectrum Beta-Lactamase“ produzierende *Escherichia coli* (ESBL-*E.coli*). Diese und andere Untersuchungen haben gezeigt, dass resistente Keime auf bzw. in Lebensmitteln auftreten. Wenn auch nicht abgeschätzt werden kann, welchen Beitrag die Antibiotikaanwendungen bei Tieren und das Vorkommen resistenter Keime in Lebensmitteln beim Zustandekommen der Resistenzproblematik im Humanbereich leisten (denn Antibiotika werden ja in der Humanmedizin in großem Umfang eingesetzt), so besteht dennoch eine Aufgabe darin, die Antibiotikagaben im Bereich der Tierproduktion auf das Notwendigste einzuschränken. Dazu gehört neben einer verstärkten systematischen Kontrolle des Antibiotikaeinsatzes vor allem die Etablierung von Tierhaltungsformen, bei denen Erkrankungen von vornherein weitgehend vermieden werden, so dass erforderliche Behandlungen minimiert werden können.

Eine weitere Herausforderung bei der Bekämpfung von Lebensmittelinfektionen muss in der konsequenteren Anwendung grundlegender, seit Jahrzehnten bekannter und bewährter *lebensmittelhygienischer Prinzipien* in der Lebensmittelkette, beginnend bei der Gewinnung bis hin zum einzelnen Verbraucher, gesehen werden. Viele Zoonoseerreger kommen in den Ausgangsprodukten, wie z. B. Fleisch, Fisch, Rohmilch oder Eier, zunächst nur in einer geringen Quantität vor. Erst wenn es zu Vermehrungs- oder Anreicherungsvorgängen kommt, entsteht eine Gefährdung für den Verbraucher. Hygieneverstöße wie mangelnde Kühlung, Unterbrechung der Kühlkette, unzureichende Erhitzung, mangelnde Heißhaltung, Vorkochen, mangelhafte Reinigung, unsachgemäße Warenpflege und sonstige sogenannte küchentechnische Fehler, die eine Keimvermehrung bzw. ihr Überleben fördern, also subjektives Versagen, sind damit in vielen Fällen der eigentliche Auslöser der Erkrankungen. Die Tätigkeit nicht ausreichend beruflich qualifizierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Lebensmittelsektor ist dabei ein ungelöstes Problem, dem nur durch entsprechende rechtliche Vorschriften zu begegnen wäre.

Aber auch der Trend, dass die Verbraucher heute über immer weniger *Wissen zum richtigen Umgang* mit Lebensmitteln verfügen, leistet dazu seinen Beitrag. Diesbezügliches Allgemeinwissen wird in den Familien und den Schulen nicht ausreichend weitergegeben bzw. vermittelt. Ausdruck dessen ist die Tatsache, dass der überwiegende Teil der gemeldeten Lebensmittelinfektionen Einzelfälle oder Erkrankungen in kleinen Gruppen (Familien) sind. Die Anforderungen an solche Kenntnisse über Lebensmittel nehmen auch wegen der schnellen Entwicklung neuer Technologien und neuartiger Produkte zu.

Leider hat auch der Gedanke, eine gesunde Ernährung sei besonders durch den Verzehr „natürlicher“, möglichst wenig oder nicht bearbeiteter Produkte (z. B. rohe Milch, Käse aus Rohmilch, nicht durchgegartes „rosa“ Fleisch, Ablehnung von Konservierungsstoffen) zu erreichen, mehr und mehr Verbreitung gefunden. Nicht wahrgenommen wird dabei die zunehmende Gefahr, sich durch pathogene Keime zu schaden. Die einseitige Orientierung auf „natürliche“ Lebensmittel ist bei unserer reichen Versorgung mit einer breiten Lebensmittelpalette auch aus ernährungsphysiologischer Sicht nicht gerechtfertigt. Insofern sollte bei der Ernährungsberatung dem Aspekt der Lebensmittelsicherheit und insbesondere der Gefährdung durch Lebensmittelinfektionserreger mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Eine ebenfalls zu beachtende Veränderung der Verzehrgewohnheiten besteht in der rasanten *Zunahme des Essens in der Gemeinschaftsverpflegung*, in Kantinen und Gaststätten. Das häufigere Essen „außer Haus“ bedeutet auch, dass viele Personen von einer Küche versorgt werden. Kommt es dabei zu Hygienefehlern, wirken sich diese auf einen weit größeren Personenkreis aus als bei individueller Versorgung. Der Norovirusausbruch über kontaminierte Erdbeeren im Schulessen führte im Jahre 2012 in Deutschland beispielsweise zu einem der größten Lebensmittelinfektionsausbrüche. Die Anforderungen an die Hygieneüberwachung durch Eigenkontrolle und die Überwachungsbehörden nehmen auch deshalb künftig zu.

Bei der Bewertung der lebensmittelbedingten Infektionen darf die *Änderung der Altersstruktur* der Bevölkerung nicht außer Acht gelassen werden. Die Lebenserwartung steigt. Damit erhöht sich zugleich die Infektionsgefährdung der älteren Menschen, bedingt durch die physiologischer Weise nachlassende Abwehrleistung des Organismus im Alter und durch eine insgesamt zunehmende Erkrankungshäufigkeit. Es ist anzunehmen, dass die hohe Anzahl an Lebensmittelinfektionen auch durch den steigenden Anteil von alten Menschen an der Bevölkerung verursacht wird. Im Jahre 1992, dem Höhepunkt der Salmonellosehäufigkeit in Deutschland, gab es etwa 200 dadurch bedingte Todesfälle. In allen Fällen handelte es sich um Menschen im Alter von über 65 Jahren. In der altersgerechten Ernährung spielt deshalb der Aspekt eines hohen Maßes an Lebensmittelsicherheit eine ganz besondere Rolle.

Künftig ist mit einer weiteren *Zunahme globaler Warenströme* auch beim Handel mit Lebensmitteln zu rechnen. Dieser Trend ist durch die zunehmende Hinwendung zu einer mehr regionalen Lebensmittelversorgung in den entwickelten Industrieländern nicht aufzuhalten. Damit steigen die Forderungen nach größtmöglicher Transparenz nicht nur über die Herkunft, sondern auch über die Herstellungsbedingungen, die Gewährleistung anerkannter Hygieneparameter, die tierschutzgerechte Erzeugung der Produkte usw. an. Gelingt die Herstellung der Transparenz nur unzureichend, so sind Probleme bei der Gewährleistung der Lebensmittelsicherheit zu erwarten. Wichtig ist dabei eine umfassende epidemiologische Information über das Auftreten pathogener Keime, u. a. auch von Seuchenerregern, in allen Teilen der Welt. Globaler Handel beinhaltet auch die potenzielle Gefahr, dass Erreger auftauchen, die hier nicht beheimatet sind bzw. deren Vorkommen bereits getilgt worden ist, z. B. Erreger der Brucellose, der Tuberkulose oder der Cholera.

Eine geographische Ausbreitung lebensmittelassoziierter Infektionserreger kann aber auch durch *Klimaveränderungen* bewirkt werden. So ist festgestellt worden, dass Infektionen mit Vibrionen (insbesondere *V. parahaemolyticus* und *V. vulnificus*) durch die Erwärmung der Meere zugenommen haben. Beispielsweise verbreitet sich der pandemische *V. parahaemolyticus*-Klon O3:K6 seit 1996 (ausgehend von Südostasien) weltweit. Insbesondere regionale klimatische Perioden mit sehr warmen Wassertemperaturen erhöhen die Gefahr von *Vibrio*-Infektionen durch Aufnahme von Meerwasser bzw. durch den Verzehr kontaminierter Fische und Krustentiere (NAIR et al. 2007).

Zur künftigen Sicherung der Versorgung mit gesunden tierischen Lebensmitteln wird es darüber hinaus erforderlich sein, durch *Forschungsarbeit* Wissenslücken zu schließen.

Solche Fragestellungen sind u. a.:

- Bewertung der Risiken bei Lebensmitteln, die mit gentechnischen Verfahren hergestellt wurden;
- Bewertung der Risiken, die aus Anwendung der Nanotechnologie bei Lebensmitteln resultieren;
- Untersuchungen zum Verhalten von Viren in Lebensmitteln;
- Untersuchungen zum Spannungsfeld Tierhaltung – Tierschutz – Lebensmittelsicherheit;
- Untersuchungen über die Optimierung des Tierhaltungsmanagements zur Gewährleistung gesunder Tierbestände;
- Untersuchung der Einflüsse neuer Herstellungs-, Verpackungs- und Vertriebstechnologien auf die Lebensmittelsicherheit;
- Bedeutung und Verminderung der Übertragung bakterieller Resistenzgene über Lebensmittel;
- Entwicklung moderner Diagnostik zur Bewertung mikrobieller Risiken in den Tierbeständen und beim geschlachteten Tier;
- Untersuchungen zum Einfluss des Klimawandels auf die Lebensmittelsicherheit.

5. Fazit

In den Industrieländern hat die Lebensmittelsicherheit heute ein hohes Niveau erreicht. Die Risiken nehmen voraussichtlich nicht zu, aber der Anspruch der Verbraucher nach gesundheitlicher Sicherheit beim Lebensmittelverzehr steigt stetig an und stellt die gesamte Kette der Lebensmittelerzeugung und des Handels vor neue Herausforderungen. Einige wichtige Aufgaben sind:

- das Verdrängen/Dezimieren des latenten Vorkommens von Zoonoseerregern in den Nutztierbeständen;
- die Verbesserung und Erhaltung der Tiergesundheit in den Nutztierbeständen;
- die Reduzierung des Auftretens von Lebensmittelinfektionen;
- die Verbesserung von Hygienemaßnahmen und die Erhöhung der Hygienekenntnisse in der Lebensmittelkette bis hin zum Verbraucher;
- die Kontrolle der zunehmenden globalen Warenströme aus Sicht der Lebensmittelsicherheit;
- Erhöhung der interdisziplinären Forschungskapazität zu Fragen der Lebensmittelsicherheit.

Literatur

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung): Jahresbericht 2011. www.bfr.bund.de (2011)

BLAHA, T., TANGEMANN, A., MEERMEIER, D., GUNDLACH, S., and MEEMKEN, D.: *Toxoplasma gondii* prevalence in confirmed pig herd measure by meat juice serology at slaughter. Safepork Congress, Maastricht 20.–22. 6. 2011, Proc. (2011)

BMELV (Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz): Statistik und Berichte des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2011. www.bmelv-statistik.de

- BVL (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit): Jahresbericht der Bundesrepublik Deutschland zum mehrjährigen nationalen Kontrollplan nach VO(EG) Nr. 882/2004. www.bvl.bund.de (2011)
- BUHR, K. DE, LUDEWIG, M., and FEHLHABER, K.: *Toxoplasma gondii*-seroprevalence – current results in German swine herds. *Arch. Lebensmittelhyg.* 56, 5–8 (2008)
- EFSA (European Food Safety Authority): European Union summary report: Trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2010. *EFSA Journal* 10, 2597 (2012)
- ERMAKOW, O., und FEHLHABER, K.: Ergebnisse der Fleischuntersuchung bei Puten. Vergleich von ökologischer und konventioneller Haltung. *Fleischwirtschaft* 92/12 (2012) (im Druck)
- FAOSTAT: Livestock production. <http://faostat.fao.org/site/569/default.aspx#ancor> (2012)
- FEHLHABER, K.: Lebensmittelwissenschaften im Dienst der Gesundheitsvorsorge. *Nova Acta Leopoldina NF Bd. 95*, Nr. 353, 205–215 (2007)
- FEHLHABER, K.: Lebensmittelsicherheit – Nehmen die gesundheitlichen Risiken für den Verbraucher zu? *Jahrbuch* 2008. *Leopoldina (R 3)* 54, 473–477 (2009)
- HEUER, O. E., PEDERSEN, K., ANDERSEN, J. S., and MADSEN, M.: Prevalence and antimicrobial susceptibility of thermophilic *Campylobacter* in organic and conventional broiler flocks. *Let. Appl. Microbiol.* 33, 269–274 (2001)
- Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart: Ermittlung der weg- geworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Vom BMELV geförderte Studie. (2012)
- MOHS, V.: Lebensmittel-„Skandale“ aus Sicht der Medien und der Wissenschaft. *Vet. med. Diss.*, Universität Leipzig 2011
- NAIR, G. B., RAMAMURTHY, T., BHATTACHARYA, S. K., DUTTA, B., TAKEDA, Y., and SACK, D. A.: Global dissemination of *Vibrio parahaemolyticus* serotype O3:K6 and its serovariants. *Clin. Microbiol. Rev.* 20, 39–48 (2007)
- RKI (Robert-Koch-Institut): Jahresstatistik meldepflichtiger Infektionskrankheiten, Deutschland. *Epid. Bull.* (2004–2012)
- RKI (Robert-Koch-Institut): *SurvStat@RKI*, <http://www3.rki.de/SurvStat/> (2012)
- Statistisches Jahrbuch 2011*: Statistisches Bundesamt Wiesbaden (2012)
- Statistisches Jahrbuch Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2011*: www.bmelv-statistik.de (2012)
- WINDHORST, H.-W.: Geflügel weist höchste Steigerungsrate auf. *Fleischwirtschaft* 92/6, 18–21 (2012)
- WINDHORST, H.-W.: Dynamische Entwicklung in Asien – Strukturen und Dynamik der Schweinefleischproduktion in Teilregionen asiatischer Länder. *Fleischwirtschaft* 91/10, 22–28 (2011)
- Wissenschaftlicher Beirat des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz*: Stellungnahme „Ernährungssicherung und nachhaltige Produktivitätssteigerung“ vom 19. 1. 2012. www.bmelv.de (2012)

Prof. Dr. Dr. h. c. Karsten FEHLHABER
Institut für Lebensmittelhygiene
An den Tierkliniken 1
04103 Leipzig
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 3338 3602 82
Fax: +49 341 973 8249
E-Mail: fehlhaber@vetmed.uni-leipzig.de

Prof. Dr. Thomas ALTER
Institut für Lebensmittelhygiene
Königsberg 69
14163 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 83 8625 60
Fax: +49 30 83 8625 52
E-Mail: thomas.Alter@fu-berlin.de

Lösungswege von Problemen des Globalen Wandels

Dilemma zwischen Energie- und Nahrungspflanzen?

Folkhard ISERMEYER (Braunschweig)



Zusammenfassung

In vorindustrieller Zeit stellte Bioenergie einen Großteil der menschlichen Energieversorgung. Derzeit liegt der Beitrag zur Energieversorgung weltweit bei ca. 10 % (überwiegend Holz sowie landwirtschaftliche Reststoffe). Der Anbau von Energiepflanzen auf Ackerland liefert weniger als 1 % der globalen Energieversorgung. In Deutschland stellen regenerative Energien insgesamt ca. 12 % des Endenergieverbrauchs. Davon stammen zwei Drittel aus Bioenergie (vorwiegend Holz). Im vergangenen Jahrzehnt dehnte sich der Anbau von Bioenergie auf deutschen Äckern infolge einer starken politischen Stützung kräftig aus. Inzwischen werden ca. 20 % der nationalen Ackerfläche für Bioenergie genutzt, doch reicht das nur für knapp 3 % des nationalen Endenergieverbrauchs.

Die stark gestiegenen Erdölpreise haben dazu geführt, dass neben dem Holz an einigen Standorten der Welt auch ackerbasierte Bioenergie ohne staatliche Förderung wettbewerbsfähig geworden ist (z. B. Ethanol aus Zuckerrohr in Brasilien). Dadurch koppelt sich das Agrarpreisniveau an das Erdölpreisniveau an. Bei fortgesetzt hohen Erdölpreisen wird die Erzeugung von Bioenergie global weiter expandieren, allerdings nur an den hierfür bestgeeigneten Standorten und mit den bestgeeigneten Bioenergielinien. Die hohen Agrarpreise bedeuten einerseits positive Entwicklungsimpulse für Landwirtschaft und ländliche Räume, andererseits verschärfen sie (a) die Ernährungskrise in vielen Entwicklungsländern und (b) die Beanspruchung der natürlichen Ressourcen durch die Landwirtschaft.

Das Leistungspotenzial der landwirtschaftlichen Bioenergie für die Weltenergiewirtschaft ist begrenzt. Um 1 % des Weltenergieverbrauchs zusätzlich bereitzustellen, würden 40 bis 50 Mio. ha Ackerfläche benötigt. Derzeit gibt es 1,5 Mrd. ha Ackerflächen. Die Expansion in den letzten 50 Jahren betrug nur ca. 100 Mio. ha. Das Expansionspotenzial ist begrenzt, wobei die Einschätzungen über das Potenzial und die mit seiner Nutzung verbundenen Risiken weit auseinandergehen.

Aus klimapolitischer Sicht ist die Erzeugung von Bioenergie auf europäischen Ackerflächen (abgesehen von der Reststoffnutzung) wenig effizient, da die CO₂-Vermeidungskosten höher liegen als bei wichtigen klimapolitischen Alternativoptionen.

Der potenzielle Beitrag der Bioenergie zur Versorgungssicherung Deutschlands ist eng begrenzt, sofern man nur Inlandsproduktion als „versorgungssicher“ ansieht. Bezieht man auch Importe mit ein, eröffnet sich ein weites Spektrum von Versorgungsoptionen mit regenerativen Energieträgern. In diesem Fall ist zu erwarten, dass sich langfristig Solar- und Windstromimporte als kostengünstigere Optionen herausstellen werden.

Die Umstellung der Weltwirtschaft auf regenerative Energieversorgung ist grundsätzlich machbar, da (a) die Sonne jährlich tausendfach mehr Energie spendet als die Menschheit benötigt und (b) die Erschließung dieser Quellen im Laufe der Zeit immer kostengünstiger wird. Bioenergie kann ein Element der Energiewende sein, doch ist dies keineswegs zwingend erforderlich. Lediglich für die Luft- und Schifffahrt könnte sich (allerdings erst im nächsten Jahrhundert) Bioenergie als unverzichtbar erweisen, doch wäre es falsch, daraus die Schlussfolgerung abzuleiten, die Politik solle künftig den Einsatz von Bioenergie in diesen Segmenten fördern.

Das Fazit lautet somit: (a) Ein Dilemma zwischen Energie- und Nahrungspflanzen besteht nicht. (b) Es wird empfohlen, die Bioenergiepolitik grundlegend zu überdenken.

Abstract

In pre-industrial times, the bulk of human energy demand was provided by bioenergy. Nowadays, bioenergy supply covers only about 10 % of global energy demand, mainly stemming from forestry and from agricultural residues. The contribution of energy plants grown on arable land is below 1 %. In Germany, the share of renewables in total energy consumption is about 12 %, two third of this stemming from bioenergy (mainly wood). Recently, the production of bioenergy on arable land has increased considerably, caused by strong policy measures. Meanwhile about 20 % of Germany's arable land is used for the production of bioenergy, delivering nearly 3 % of the national energy consumption.

Due to the strong increase of crude oil prices, in some parts of the world the production of bioenergy on arable land has become profitable even in the absence of policy support (e.g. ethanol from sugar cane in Brazil). As a consequence, the agricultural price trends are now influenced by the fossil fuel price trends. If crude oil prices will stay on a high level, the global bioenergy acreage will further expand, yet only in the best-suited locations and in the most efficient bioenergy-lines. High agricultural prices can be beneficial for the development of agriculture and rural areas. On the other hand, they aggravate the food crisis in many developing countries and enhance negative impacts of agriculture on natural resources.

1. Einleitung

Der zur Leopoldina-Jahrestagung vorgegebene Titel dieses Beitrags war nicht mit einem Fragezeichen versehen. Somit stand die Behauptung im Raum, zwischen Energie- und Nahrungspflanzen gäbe es ein Dilemma. Eine gelungene Provokation, die einen politikberatenden Wissenschaftler herausfordert.

Der Ausdruck „Dilemma“ bezeichnet „die Schwierigkeit der Wahl zwischen zwei Dingen, wenn für beide gleichwertige Gründe sprechen“ (*Brockhaus* 1953). Befindet sich die Gesellschaft beim Thema „Tank oder Teller“ tatsächlich in einer derartigen Zwangslage?

Um diese Frage zu beantworten, wird der vorliegende Beitrag in drei Schritten aufgebaut. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die wichtigsten Trends der Weltagrarwirtschaft und der Weltenergiewirtschaft gegeben. Hierbei ist es vor allem wichtig, den Zusammenhang zwischen beiden Sektoren herauszuarbeiten. Anschließend werden die mengenmäßigen Potenziale der Bioenergie im nationalen und im weltweiten Maßstab untersucht. Im dritten Teil erfolgt eine Bewertung der bisherigen Bioenergiepolitik vor dem Hintergrund der verschiedenen Ziele, die die Politik erreichen möchte. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wird abschließend eine Antwort auf die „Dilemma“-Frage gegeben.

2. Weltagrarwirtschaft und Weltenergiewirtschaft

2.1 Entwicklung der Weltagrarwirtschaft

Weltweit werden ungefähr 1,5 Mrd. ha landwirtschaftlich genutzte Fläche für Ackerbaukulturen sowie Obst und Gemüse genutzt. Die Anbauflächen sind in den vergangenen 50 Jahren insgesamt nur um ca. 12% ausgedehnt worden (vor allem im Bereich Ölpflanzen), die Produktionsmenge der Weltagrarwirtschaft hat sich jedoch mehr als verdoppelt. Dieser bemerkenswerte Zuwachs ist also größtenteils durch Ertragssteigerungen erreicht worden (*FAO* 2011).

The possible contribution of bioenergy from arable land to global energy supply is limited. A rough estimation shows that an additional 40 to 50 million ha would be needed to produce 1 additional percent of global energy demand. Currently, total global acreage of arable land amounts to 1.5 billion ha. The potential for further expansion is limited; yet, there are diverging estimates regarding the potential's magnitude and the risks involved. From a climate policy perspective, bioenergy production based on arable land in Europe (besides of residue production) is not efficient because mitigation cost per tonne of CO₂-equivalent are higher than for important other climate policy options.

For Germany, the possible contribution of bioenergy to the policy goal „security of supply“ is very limited, as long as the society would only regard domestic production as secure. If certain imports are also accepted as secure, however, a wide range of renewable energy supply options opens up. In this case it can be expected that imported solar and wind energy will turn out to be the most economic options in the long run.

In principle, it will be possible to base global economy on renewable energy supply. The sun gives us thousand-fold more energy than is consumed annually by the global economy, and the cost of making this energy supply available for the global economic system is decreasing. Bioenergy can be an element of the future energy supply system, yet there is no need that it has to be an element. Only transportation by ship and aircraft may become dependent on bioenergy in the very long run (next century). However, this does not lead to the recommendation that policy should support the use of bioenergy in these branches. The overall conclusion is: (a) There is no dilemma between energy crops and food crops. (b) It is recommended to reconsider bioenergy support policies.

Knapp die Hälfte der Weltackerfläche wird für den Anbau von Getreide genutzt. Der Durchschnittsertrag je Hektar Getreide liegt derzeit im Weltdurchschnitt bei ca. 3,5 t/ha, d. h. nur ungefähr halb so hoch wie in Mitteleuropa. Dieser Vergleich lässt sich in zwei Richtungen deuten: einerseits dahingehend, dass in Mitteleuropa relativ gute Standortbedingungen für den Ackerbau herrschen (fruchtbare Böden, mildes Klimas, relativ hohe Sommerniederschläge), andererseits dahingehend, dass in anderen Erdteilen noch größere, bisher ungenutzte Potenziale für Ertragssteigerungen bestehen. Vermutlich sind beide Interpretationen teilweise richtig.

Die Nachfrage nach Agrarprodukten wurde in den letzten Jahrzehnten im Wesentlichen durch zwei Einflussfaktoren getrieben: vor allem durch den steigenden Nahrungsmittelbedarf einer stetig wachsenden Weltbevölkerung, in geringerem Maße aber auch durch die Veränderung der Nahrungszusammensetzung. Steigendes Pro-Kopf-Einkommen führt zu einem steigenden Anteil von Fleisch und Milchprodukten, und bei der Erzeugung dieser Produkte wird relativ viel Futterenergie je Kilogramm Nahrungsmittel benötigt. Im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts gesellte sich mit der zunehmenden Nachfrage nach Bioenergie ein dritter Nachfragetreiber hinzu (siehe Kapitel 3).

Aller Voraussicht nach werden die beiden ersten Nachfragetreiber auch in den kommenden Jahrzehnten dafür sorgen, dass die Nachfrage nach Futter- und Nahrungsmitteln weiterhin wächst. Dabei wird überwiegend von einer Fortschreibung der linearen Trends der vergangenen drei bis vier Jahrzehnte ausgegangen. Zwar schwächt sich das globale Bevölkerungswachstum etwas ab, doch kann der hieraus resultierende Entlastungseffekt durch Kaufkraftsteigerungen, veränderte Konsumgewohnheiten, Urbanisierung usw. kompensiert oder überkompensiert werden (*Foresight* 2011).

In manchen Zukunftsprojektionen wird die Einschätzung vertreten, das Produktionswachstum werde mit dem Nachfragewachstum nicht oder kaum Schritt halten können (*WBA* 2012). Hierzu sind jedoch einige Erläuterungen erforderlich: Grundsätzlich kann nicht mehr verbraucht werden, als zuvor produziert worden ist. Steigt die Nachfrage stark an, so hat dies Preissteigerungen zur Folge. Diese Preissteigerungen erhöhen die Rentabilität der Landwirtschaft und führen in der Folgeperiode zu einem Produktionsanstieg (z. B. durch Inkulturnahme von Flächen oder durch Intensivierung der Produktion); andererseits führen sie aber ebenfalls zu einem Verbrauchsrückgang an den bisherigen Verbrauchsstellen. In einer globalisierten Marktwirtschaft betrifft das grundsätzlich alle Verbrauchsstellen, d. h. sowohl den Verbrauch von Fleisch und Milchprodukten als auch die Verwendung von Biomasse im Energiebereich, aber z. B. auch die Ernährungslage in den ärmsten Ländern der Welt.

Eine Analyse der Agrarpreisentwicklung in den vergangenen 20 Jahren deutet darauf hin, dass sich die weltweiten Knappheitsverhältnisse im Agrarsektor seit ungefähr 2005 grundlegend verändert haben. Die Weltagrarpreise liegen seither ungefähr doppelt so hoch wie in den 1990er Jahren und in der ersten Hälfte dieses Jahrzehnts. Der Erdölpreis ist in diesem Zeitraum jedoch noch wesentlich stärker gestiegen, er liegt nun ungefähr auf dem Fünffachen des Niveaus der 1990er Jahre.

Die Gegenüberstellung von Erdöl- und Agrarpreisentwicklung erfolgt hier mit Bedacht. Es ist nämlich davon auszugehen, dass sich künftig – sofern der Erdölpreis nicht wieder auf das niedrige Niveau von vor 2005 zurückfällt – aus den jeweiligen Erdölpreisen eine längerfristige Preisuntergrenze für das Weltagrarpreisniveau ableiten lässt.

Diese „Ankopplung“ der Agrarpreise an das Erdölpreisniveau kommt durch folgende Wirkungskette zustande: Vom Erdölpreis leitet sich der Benzinpreis ab, und von diesem

der Ethanolpreis, da sich Ethanol und Benzin auf Grund der Fortschritte in der Motorenentwicklung immer besser gegeneinander substituieren lassen. Vom Ethanolpreis wiederum leitet sich ab, welchen Preis die Ethanolfabriken für Agrarrohstoffe zahlen können. Je höher also der Erdölpreis, desto höher der zahlbare Preis für Agrarrohstoffe.

Als die Weltagrarpreise nach jahrzehntelangen Realpreissenkungen zwischen 2000 und 2005 auf einem sehr niedrigen Niveau angekommen waren, kalkulierten Agrarökonom, dass es in Brasilien, dem weltweit bestgeeigneten Standort für die Ethanolproduktion, bei einem Erdölpreis von ca. 40 Dollar pro Barrel rentabel würde, Zuckerrohr zu Ethanol zu verarbeiten (SCHMIDHUBER 2006). Wenn der Erdölpreis weiter steigt, so schon damals die Schlussfolgerung, würde früher oder später auch das Weltagrarpreisniveau mit nach oben gezogen werden.

Wichtig ist, dass von dieser Wirkungskette nicht nur ein Agrarrohstoff betroffen ist, beispielsweise Zuckerrohr, sondern langfristig alle Agrarrohstoffe. Das liegt daran, dass die Agrarrohstoffe an allen Produktionsstandorten der Welt um den Platz in den standörtlichen Fruchtfolgen konkurrieren. In der Gesamtwirkung ergibt sich eine hohe Substituierbarkeit, d. h. eine Preissteigerung beispielsweise bei Zuckerrohr führt zunächst zu einer Ausweitung der Zuckerrohrfläche und nachfolgend schrittweise auch zu Verknappungen und entsprechenden Preissteigerungen bei allen anderen Agrarprodukten.

Diese Anpassungen erfordern jedoch Zeit, denn die dargelegte Wirkungskette kommt nur zustande, wenn Investoren in der Erwartung hoher Erdölpreise und vergleichsweise moderater Agrarpreise Ethanolfabriken bauen lassen. In der Vergangenheit ist es zu solchen marktgetriebenen Investitionen kaum gekommen, weil die Politik dem geschilderten Markt Anpassungsprozess durch Förderaktivitäten, Beimischungsregelungen usw. permanent vorgegriffen und ihn dabei „planwirtschaftlich“ überreguliert hat. Insofern wäre es nicht korrekt, den seit 2005 empirisch feststellbaren Zusammenhang zwischen Agrar- und Erdölpreisanstieg als empirischen Beweis für die (künftig) erwartete Ankopplung des Agrarpreis- an das Erdölpreisniveau werten zu wollen.

Auch wenn sich also der empirische Beweis wahrscheinlich erst in ein oder zwei Jahrzehnten führen lassen wird, bleibt als Ergebnis der theoretischen Analyse erst einmal festzuhalten: Wenn die Erdölpreise auf dem derzeitigen, hohen Niveau bleiben oder sogar noch weiter steigen, dann werden die Marktkräfte dafür sorgen, dass sich die Bioenergie an den bestgeeigneten Standorten schrittweise ausbreitet, ohne dass es politischer Förderung bedarf. Das Weltagrarpreisniveau kann dann im längerfristigen Preistrend nicht mehr auf das niedrige Niveau von vor 2005 zurückfallen. Konjunkturelle Preistäler, die auf wenige Jahre beschränkt sind, wird es jedoch auch bei einem hohen Agrarpreisniveau immer wieder geben.

Mit diesem Kernergebnis der theoretischen Analyse rückt die Frage in den Mittelpunkt, wie wahrscheinlich das Szenario „dauerhaft hohe Erdölpreise“ ist. Diese Frage wird im folgenden Kapitel adressiert.

2.2 Entwicklung der Weltenergiewirtschaft

Die jüngste Projektion der Internationalen Energieagentur (IEA 2012a, b) geht davon aus, dass der Weltenergieverbrauch auch in den kommenden Jahrzehnten weiterhin stark zunehmen wird. Im Basisszenario (Fortschreibung derzeitiger Politik) wird von einem Anstieg des Primärenergieverbrauchs von 519 EJ im Jahr 2010 auf 701 EJ im Jahr 2035

ausgegangen. Das kommt im Wesentlichen einer Fortschreibung der bisherigen Entwicklungslinien (einschließlich Umwelt- und Klimaschutzpolitik) gleich. Es werden auch zwei Szenarien vorgestellt, in denen die internationale Staatengemeinschaft stärkere Anstrengungen zur Eindämmung der Treibhausgasemissionen unternimmt. Doch selbst in diesen Szenarien nimmt der Energieverbrauch stark zu, mindestens mit der halben Expansionsrate des Basisszenarios (*IEA 2012b*).

Da die permanente Steigerung der Erdölförderung in Anbetracht der begrenzten Vorräte in absehbarer Zeit zu einem Ende kommen wird (*GEHRLING et al. 2004*), gehen viele Menschen in der längerfristigen Perspektive eher von einem weiteren Anstieg als von einem Rückgang der Erdölpreise aus. Auch die IEA projiziert in ihrem Basisszenario einen inflationsbereinigten Anstieg von derzeit ca. 110 auf ca. 140 US-\$/bbl im Jahr 2035.

So plausibel die Erwartung eines weiteren Anstiegs des Erdölpreises für viele Menschen auch sein mag, es kann auch ganz anders kommen. Angesichts der Bedeutung, die der Erdölpreis künftig für die marktgetriebene Expansion der Bioenergie und für das Agrarpreisniveau haben wird, soll im Folgenden kurz erörtert werden, welche Grundkonstellationen zu einem Rückgang des Erdölpreises führen könnten.

Erste Konstellation: Der Anstieg des Weltenergieverbrauchs wird gestoppt. Das erscheint aus heutiger Sicht sehr unwahrscheinlich (siehe oben), es sei denn, es käme zu einer gravierenden und länger andauernden Weltwirtschaftskrise.

Zweite Konstellation: Der Ausbau regenerativer Energien kommt weltweit sehr schnell voran. Das erscheint ebenfalls wenig wahrscheinlich, da die regenerativen Energien gerade in der Startphase relativ teuer sind und der Aufbau von Know-how, Zuliefersystemen, Leitungsnetzen usw. zeitraubend ist. Im Basisszenario der IEA (Fortschreibung derzeitiger Politik) verharren die traditionellen Biomasselinien (hauptsächlich Brennholz) zwischen 2010 und 2035 bei ca. 30 EJ/Jahr, während die sonstigen regenerativen Energielinien (vor allem „moderne“ Biomassenutzung, Wasserkraft, Solar- und Windenergie) mit Hilfe massiver politischer Unterstützung (weltweit 88 Mrd. US-\$ im Jahr 2011) immerhin von derzeit 32 EJ (2010) auf 65 EJ (2035) ansteigen (*IEA 2012b*). Da aber der Gesamtenergieverbrauch im gleichen Zeitraum von 519 auf 701 EJ ansteigt, erhöht sich der Anteil der regenerativen Energien lediglich von 12,2 auf 13,5%. Der relativ geringe Anstieg der regenerativen Energien mag teilweise darauf zurückzuführen sein, dass die politisch induzierte Förderung derjenigen Energielinien, die auf fossilen Energieträgern beruhen, mit 523 Mrd. US-\$ (2011) noch wesentlich höher ausfällt (*IEA 2012b*). Doch selbst im klimapolitisch günstigsten Szenario der IEA (2012b), in dem die Politik noch einmal deutlich verändert wird, steigen die Beiträge der regenerativen Energien bis 2035 lediglich auf insgesamt 131 EJ/Jahr (verglichen mit 95 EJ/Jahr im Basisszenario; alle Zahlen sind eigene Berechnungen auf Basis *IEA 2012a*).

Dritte Konstellation: Es kommt – angeregt durch die derzeit hohen Energiepreise – im fossilen Energiesegment (Erdgas, Kohle, Atomenergie, Ölschiefer und -sande) noch einmal zu sehr großen Investitionsschüben, so dass das Energieangebot stärker steigt als die Nachfrage und somit alle Energiepreise (einschließlich Erdöl) sinken. Diese Konstellation hat eine wesentlich höhere Eintrittswahrscheinlichkeit als die beiden ersten und soll deshalb etwas eingehender diskutiert werden.

Die Entwicklung des nordamerikanischen Erdgaspreises in den letzten 10 Jahren zeigt, dass die Marktgesetze im Energiesektor nicht außer Kraft gesetzt sind und insofern sich bei reichlichem Angebot auch wieder niedrigere Preise herausbilden können (*IEA 2012a, b*).

Die Energiemärkte sind weltweit verbunden, so dass sich Preissenkungen in einer Region und bei einem Energieträger nach einer gewissen Anpassungszeit auf das globale Energiepreisniveau auswirken (IEA 2012a, b), und im weltweiten Maßstab sind die mengenmäßigen und technologischen Voraussetzungen für ein letztes (oder vorletztes) Aufbäumen des fossilen Energiesegments durchaus gegeben.

Die nachgewiesenen Erdölreserven reichen (bei Fortschreibung des derzeitigen Jahresverbrauchs) zwar nur noch für ca. 50 Jahre, doch wird voraussichtlich die Entdeckung weiterer konventioneller Erdölvorkommen sowie die Erschließung unkonventioneller Erdölquellen (z. B. Ölschiefer, Ölsande, Bitumen) den Zeithorizont der Nutzungsmöglichkeit in diesem fossilen Energiesegment auf über 100 Jahre hinausschieben (IEA 2012b). Bei Erdgas und Kohle ergeben sich potenzielle Nutzungszeiträume von mehreren hundert Jahren, wenn die Ausbeutung von schwer zugänglichen Gaslagerstätten mit Hilfe von Fracking-Technologien berücksichtigt wird (BGR 2005, WBA 2008).

Aus Gas und Kohle können auch Flüssigkraftstoffe hergestellt werden. Die Rentabilitätsschwelle für die Kohle- und Gasverflüssigung wurde Mitte des letzten Jahrzehnts in der Größenordnung von 50 US-\$/bbl angegeben (WBA 2008 und dort zitierte Quellen). Insofern ist es durchaus möglich, dass die fossile Energiewirtschaft bei derzeitigen Erdölpreisen um 100 US-\$/bbl in ihrer ganzen Breite (Wärme, Strom, Treibstoffe) noch einmal viel Schubkraft entwickelt und Produktionskapazitäten aufbaut, welche für einige Jahrzehnte durchaus oberhalb der (stark steigenden) Energienachfrage liegen können. Mittelfristig (z. B. im kommenden Jahrzehnt) könnte es also weltweit wieder zu einer Phase niedriger Energiepreise kommen, wie dies in den 1990er Jahren weltweit zu beobachten war.

Die aktuellen, fast euphorischen Meldungen über den nordamerikanischen Erdgasboom, den Einsatz von Fracking und die Hoffnung der USA auf künftige Energieautarkie scheinen in diese Richtung zu weisen. Andererseits muss man sich vor Augen führen, dass die USA derzeit einen Energienettoimport in der Größenordnung von 23 EJ/Jahr aufweisen. Setzt man diesen Wert in Beziehung zum prognostizierten Wachstum des jährlichen Weltenergiebedarfs um über 170 EJ/Jahr bis 2035 (siehe oben), so stellt sich der US-Energieimport als eine gewiss bedeutsame, aber keineswegs alles überragende Determinante dar.

Von wesentlich größerer Bedeutung für die Zukunft des Weltenergiepreisniveaus wird die Frage sein, ob die internationale Staatengemeinschaft sich zu einem global wirksamen Klimaschutzabkommen durchringen kann oder nicht. Mehr als die Hälfte der anthropogenen Treibhausgasemissionen entsteht durch die Nutzung fossiler Brennstoffe. Wenn diese Nutzung bis 2035 so ausgedehnt wird, wie dies im IEA-Basisszenario vorgezeichnet ist (siehe oben), dann wird die Menschheit das 2-Grad-Ziel verfehlen und einen deutlich höheren Anstieg der Durchschnittstemperatur hinnehmen müssen (IEA 2012b).

Nehmen wir für einen Moment an, es käme – allen bisherigen Rückschlägen zum Trotz – in wenigen Jahren doch noch zu einem weltweit verbindlichen und wirksamen Vertragsabschluss. Dies hätte zur Folge, dass innerhalb des Energiesegments Atomkraft, regenerative Energien und Erdgas tendenziell Rückenwind erhielten, während insbesondere die Kohlenutzung zurückgedrängt würde. Die Energiepreise für fossile Energieträger würden auf der Erzeugerseite sinken (weniger Nachfrage), auf der Verbraucherseite hingegen steigen, weil die Kosten der Emissionszertifikate letztlich auf die Verbraucherpreise überwältigt werden. Bei Wind- und Solarenergie würden sowohl die Erzeuger- als auch die Verbrau-

cherpreise steigen (mehr Nachfrage, keine Zertifikatskosten). Die Preisentwicklung für Bioenergie hinge stark davon ab, welche politischen Regelungen bezüglich der Landnutzungseffekte festgelegt würden (siehe Kapitel 4).

Aus heutiger Sicht erscheint jedoch die Annahme realistischer, dass es in absehbarer Zeit nicht zu einem weltweit verbindlichen und wirksamen Klimaschutzabkommen kommen wird. In diesem Szenario ist zu erwarten, dass sich die Akteure in Politik und Wirtschaft im Laufe der Zeit immer stärker von den reinen Bereitstellungskosten der Energieträger leiten lassen, während die unterschiedlichen Treibhausgas-effekte verschiedener Energieträger zunehmend aus dem Blickfeld geraten. Erdgas und Kohle könnten dann bis weit ins nächste Jahrhundert hinein eine dominante Rolle im Weltenergiesystem spielen.

Wovon hängt in diesem Szenario der Energiepreis ab? Die oft zu hörende Meinung, fossile Energieträger seien knappe Ressourcen und würden deshalb von den Verfügungsberechtigten mit dem Ziel der Ressourcenschonung sparsam verwendet werden, spielt wahrscheinlich kaum eine Rolle. *Erstens* denken die Verfügungsberechtigten, die untereinander im Existenzwettbewerb stehen, zumeist in viel kürzeren Zeiträumen und blenden Knappheitszeitzustände aus, wenn diese erst in hundert Jahren auftreten. *Zweitens* wird sich im Laufe der Zeit die Erkenntnis durchsetzen, dass Energie grundsätzlich überhaupt nicht knapp ist (siehe Kapitel 3) und dass in ein- oder zweihundert Jahren regenerative Energien reichlich und kostengünstig zur Verfügung stehen werden. Daher ist nicht zu erwarten, dass sich auf der Angebotsseite eine Strategie „knappe Rohstoffe horten“ durchsetzen wird. Und das bedeutet: Wenn es zu keinem weltweit verbindlichen und wirksamen Klimaschutzabkommen kommt, wird der „Welt-Energiepreis“ (bei gegebener Nachfrage) in erster Linie durch die Grenzkosten der Erschließung neuer Reserven bestimmt.

Diese Grenzkosten für verschiedene Ausbaugeschwindigkeiten realitätsnah abzuschätzen und in Relation zu den Energiepreisen zu setzen, stellt eine große methodische Herausforderung dar. In der Forschungspraxis scheitern Quantifizierungsversuche in der Regel daran, dass die erforderlichen Daten ein gut gehütetes Betriebsgeheimnis der Konzerne darstellen und nicht öffentlich verfügbar sind. Insofern ist die Einschätzung der IEA (2012b), der Erdölpreis werde bis zum Jahr 2035 real weiterhin ansteigen, eine mutige Szenarioprojektion, die aber keinesfalls als belastbare Prognose missverstanden werden darf.

Bei Marktmodellen ist generell zu beachten, dass Preisprojektionen mit wesentlich größeren Unsicherheiten behaftet sind als Mengenprojektionen. Konkret sollte zu denken geben, dass um das Jahr 2005 von verschiedenen Einrichtungen (einschließlich IEA) Preisprojektionen des Erdölpreises veröffentlicht wurden, die durchaus ähnliche Mengenentwicklungen beinhalteten wie die jetzt vorliegende IEA-Projektion, aber allesamt für den Erdölpreis bis zum Jahr 2030 einen Preiskorridor zwischen 40 und 60 US-\$/bbl (in Preisen von 2005) erwarteten (*WBA* 2008).

Fazit: In den kommenden Jahrzehnten wird die Weltenergiewirtschaft weiterhin durch fossile Energieträger dominiert. Der Anteil regenerativer Energien steigt nur langsam an. Die Aussichten für ein wirksames globales Klimaschutzabkommen sind gering. Diese Perspektive, in Verbindung mit den derzeit hohen Energiepreisen, lässt einen starken Ausbau des fossilen Energiesegments wahrscheinlich werden. Zwar geht das IEA-Basis-szenario davon aus, dass die Energiepreise dennoch weiter steigen, doch ist diese Preisprojektion mit einer erheblichen Unsicherheit behaftet.

3. Potenziale der Bioenergie

3.1 Zur Interpretation von Potenzialabschätzungen

Es existiert inzwischen eine kaum noch zu überblickende Fülle von Szenarien, Abschätzungen, Potenzialstudien usw., in denen Wissenschaftler zu den Potenzialen der Bioenergie als Energiequelle für Deutschland Stellung genommen haben. Einige dieser Arbeiten hat zuletzt der Bioökonomierat (2011) in seiner Stellungnahme aufgegriffen, ohne hierbei Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Der Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik hat in seinem Gutachten zur Bioenergie darauf hingewiesen, dass all diesen Potenzialstudien – wenn sie für ein Land wie Deutschland erstellt werden – ein schwerwiegender Mangel anhaftet (*WBA* 2008): Es wird nämlich implizit unterstellt, Deutschland sei ein nach außen abgeschotteter Wirtschaftsraum, innerhalb dessen die Politik das landwirtschaftliche Produktionsprogramm festlegen könne. Die Wirtschaftsrealität sieht jedoch anders aus: Der Agrarsektor ist ebenso wie der Energiesektor eng in die internationale Arbeitsteilung eingebunden, und die Politik hat nur geringe Möglichkeiten, die inländische Produktion von Bioenergie dauerhaft anders zu lenken (Standorte, Im- und Exporte, Produktpalette), als sich dies unter dem Einfluss der Marktkräfte ergibt.

Das hat Konsequenzen. So kann es beispielsweise dazu kommen, dass ein Land die Verwendung von Bioenergie hoch subventioniert und dennoch die inländische Agrarwirtschaft kaum Biomasse zur Energiegewinnung erzeugt, weil Importbioenergie kostengünstiger angeboten wird. Es könnte aber ebenso der Fall eintreten, dass die inländische Bioenergieerzeugung immer weiter ansteigt, obwohl keinerlei politische Förderung der nationalen Bioenergie erfolgt. Vor diesem Hintergrund ist es wenig sinnvoll, genau quantifizieren zu wollen, wie viel Fläche in Deutschland künftig für Bioenergie „frei“ würde, wenn beispielsweise die Bevölkerung zurückginge und/oder die Pflanzenerträge stiegen und/oder weniger Fleisch gegessen würde.

Besonders problematisch ist es, aus den Ergebnissen der Potenzialabschätzungen Empfehlungen bezüglich der politischen Förderung der Bioenergie ableiten zu wollen, denn solche Ableitungen erfolgen in aller Regel „freihändig“ und werden nicht stringent anhand eines kosten-nutzen-analytischen Bewertungsrahmens entwickelt.¹ Wenn die Förderung der Bioenergie volkswirtschaftlich nicht sinnvoll ist, kann dieser Makel nicht dadurch geheilt werden, dass die Förderung auf 1, 2 oder 3 Mio. „nicht mehr benötigte“ Hektare in Deutschland beschränkt bleibt. Umgekehrt gilt: Wenn die Förderung der Bioenergie volkswirtschaftlich sinnvoll wäre, z. B. um in einem perspektivreichen Wirtschaftssegment internationale Technologieführerschaft zu erringen, bräuchte sich die Politik nicht an irgendwelche Obergrenzen „nicht mehr benötigter“ Agrarflächen zu halten. Die Lebensmittelregale in Deutschland wären selbst in einem Extremszenario, bei dem alle Agrarflächen ausschließlich zur Bioenergieerzeugung genutzt würden, immer noch bestens gefüllt. Vielleicht lässt sich die Logik dieser Argumentation besser verstehen, wenn man „Deutschland“ durch „Hamburg“ oder „Saarland“ ersetzt.

Bezüglich der Nutzbarkeit von mengenmäßigen Potenzialabschätzungen für die Politikberatung sind zwei Ergebnisse festzuhalten.

¹ Vgl. z. B. *Leopoldina* 2012.

Erstens: Je kleiner die Region, desto unsinniger ist es, Potenzialabschätzungen über die maximal für Bioenergie nutzbaren Flächen in dieser Region durchzuführen. Sofern Potenzialanalysen für die Bioenergie für sinnvoll gehalten werden, sollten sie auf globalem Niveau durchgeführt werden.

Zweitens: Für die Frage, ob die Förderung der Bioenergie sinnvoll ist oder nicht, müssen andere Beurteilungsmaßstäbe herangezogen werden als das regionale Flächenpotenzial einer Region oder einer Nation.

3.2 Bioenergiepotenziale in Deutschland

In Deutschland wurden im Jahr 2011 ca. 12,2% des Endenergieverbrauchs (EEV) aus regenerativen Energieträgern erzeugt. Ungefähr zwei Drittel davon kamen aus der Biomasse, die somit mit einem Versorgungsbeitrag von 8,2% das wichtigste Segment unter den regenerativen Energieträgern darstellt. Die Beiträge der Windenergie (ca. 2%) und der Solarenergie (ca. 1%) bleiben bisher noch deutlich dahinter zurück.²

Innerhalb des Bioenergiesegments ist traditionell Holz der mit Abstand wichtigste Energieträger; der derzeitige Anteil am EEV liegt bei 4,3%. Bioenergie auf der Grundlage von Ackerfrüchten gewann erst im Laufe der vergangenen 15 Jahre an Bedeutung und hat im Jahr 2011 einen Anteil von 3,3% erlangt. Inzwischen stammt jedoch ein nennenswerter Teil der verwendeten Rohstoffe aus Importen. Der derzeitige Versorgungsbeitrag der Bioenergie, die von inländischen Ackerflächen gewonnen wird, dürfte in der Größenordnung von 2,5% des EEV liegen.

Die bemerkenswerte Expansion des Segments „Bioenergie vom Acker“ kam in erster Linie durch die umfangreiche politische Unterstützung zustande. Im Bereich der Biokraftstoffe (Biodiesel, Ethanol) bestand die Unterstützung zunächst in einer Befreiung von der Mineralölsteuer; diese Maßnahme wurde jedoch im weiteren Verlauf durch Beimischungsgebote ersetzt. Im Bereich der Strom- (und teilweise Wärmeerzeugung) steht die Förderung der Biogaserzeugung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz im Vordergrund. Dieses Gesetz verpflichtet Energieversorgungsunternehmen, mit regenerativen Energieträgern erzeugten Strom zu staatlich festgelegten Vergütungssätzen aufzunehmen. Somit werden die Mehrkosten der regenerativen Energien inzwischen in allen Segmenten von den Energieverbrauchern getragen. Die Zusatzbelastung der Stromkunden durch die Biogas-Politik liegt in einer Größenordnung von 2 Mrd. Euro pro Jahr (*WBA* 2011).

Der Flächeneinsatz für die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe wird für das Jahr 2012 auf ca. 2,5 Mio. ha landwirtschaftlich genutzte Fläche geschätzt, das sind ca. 15% der landwirtschaftlichen Nutzfläche (17 Mio. ha) bzw. ca. 20% des Ackerlandes Deutschlands (12 Mio. ha). Nahezu 85% der Fläche, die gegenwärtig für nachwachsende Rohstoffe genutzt wird, wird für den Anbau von Energiepflanzen verwendet, insbesondere von Raps für Biodiesel und Mais für Biogas. Der Anbau von Pflanzen für Festbrennstoffe, wie Agrarholz und Miscanthus, hat mit unter einem halben Prozent an der Gesamtfläche für nachwachsende Rohstoffe nur eine sehr geringe Bedeutung. Der Anbau nachwachsender Rohstoffe für die stoffliche bzw. industrielle Nutzung wird gegenwärtig auf rund 400 000 ha bzw. 2% der landwirtschaftlich genutzten Fläche betrieben. Mehr als die Hälfte davon entfällt auf Industriestärke, ein weiteres Viertel auf technisch genutztes Rapsöl (*JUNKER et al.* 2012).

² Eigene Berechnungen auf Basis *BMU* 2012.

Diese Zahlen verdeutlichen, dass das Potenzial der Biomasse vom Ackerland für die Energieversorgung Deutschlands gering bleibt, wenn der derzeitige Bioenergie-Mix beibehalten wird. Selbst wenn die Hälfte des Ackerlands (6 Mio. ha) für die Energieerzeugung eingesetzt würde, bliebe der Versorgungsbeitrag deutlich unter 10%.

Die Möglichkeiten, durch eine Veränderung des Bioenergie-Mix zu höheren Versorgungsbeiträgen zu kommen, sind begrenzt. Eine vergleichende Analyse der verschiedenen Bioenergielinien zur Mitte des letzten Jahrzehnts führte zu dem Ergebnis, dass der Netto-Endenergieertrag in einem Spektrum zwischen 18 und 126 GJ/ha lag (*WBA* 2008). Selbst wenn es gelänge, alle Anlagen im oberen Bereich (Größenordnung 100 GJ/ha) zu positionieren, ließen sich auf den 12 Mio. ha Ackerland Deutschlands noch nicht einmal 15% des deutschen EEV (9 Mrd. GJ/Jahr) erzeugen.

Die Möglichkeiten, Bioenergie aus Rest- und Abfallstoffen der Landwirtschaft zu gewinnen (vor allem aus Stroh, Rübenblatt, Fleischabfällen, Gülle, Mist), dürfen ebenfalls nicht überschätzt werden. Das technische Energiepotenzial in diesem Bereich wird in einer Spannweite zwischen 150 und 400 Mio. GJ/Jahr veranschlagt. Die Frage, welcher Teil dieses Potenzials zu volkswirtschaftlich akzeptablen Kosten zu nutzen ist, ist noch weitgehend unbeantwortet. Das gilt auch für die Frage, inwieweit ein Teil der Lebensmittelverluste, deren Gesamtgewicht (ohne Getränke) für Deutschland auf ca. 11 Mio. t/Jahr geschätzt wird (vgl. *PETER et al.* 2012), für Bioenergiezwecke nutzbar gemacht werden könnte.

3.3 Bioenergiepotenziale weltweit

Weltweit wird der derzeitige Anteil der Bioenergie an der Primärenergieerzeugung auf 10,0% geschätzt, der Anteil am Endenergieverbrauch auf 12,7% (*IEA* 2012a). Der mit weitem Abstand wichtigste Bioenergeträger ist Holz. In einigen Ländern (z. B. Indien) spielt auch getrockneter Kuhmist eine wesentliche Rolle. Der Anteil der Bioenergieerzeugung aus ackerbaulich erzeugten Energiepflanzen am Endenergieverbrauch ist demgegenüber relativ gering; er liegt gegenwärtig bei ca. 0,7%.

Bei den ackerbürtigen Bioenergien stehen, weltweit gesehen, Bioethanol und Biodiesel im Vordergrund. Demgegenüber blieb die Erzeugung von Biogas auf Basis von Energiepflanzen bisher weitgehend auf Europa beschränkt.

Die globale Ethanolproduktion findet vorwiegend auf der Basis von Mais (Schwerpunkt USA) und Zuckerrohr (Schwerpunkt Brasilien) statt. Im Jahr 2011 lagen die USA mit einer Produktionsmenge von 54,2 Mrd. l deutlich vor Brasilien (21,0 Mrd. l), doch wird für die weitere Zukunft wieder mit einem wesentlich stärkeren Wachstum in Brasilien gerechnet. Die USA und Brasilien zusammen erzeugten 2011 zusammen fast 90% der globalen Ethanolmenge von 86,1 Mrd. l (*REN21* 2012).

Die Weltproduktion von Biodiesel lag 2011 bei 21,4 Mrd. l. Hier lag die EU (Schwerpunkt Raps) mit 9,2 Mrd. l vorn, gefolgt von den USA (3,2 Mrd. l), Argentinien (2,8 Mrd. l) und Brasilien (2,7 Mrd. l), alle drei mit Schwerpunkt Soja, und Indonesien (1,2 Mrd. l, Schwerpunkt Palmöl) (*REN21* 2012).

Eine exakte Abschätzung des derzeitigen Flächeneinsatzes für die Erzeugung von Biomasse zur Energiegewinnung ist schwierig, weil es hierzu keine offizielle Statistik gibt und unterschiedliche Erzeugungsstandorte zu berücksichtigen sind. Für das Jahr 2006, als der politisch induzierte Biokraftstoffboom gerade seinen stärksten Aufschwung nahm, schätz-

ten COTULA et al. (2008) den Flächeneinsatz auf 14 Mio. ha, KAMPMAN et al. auf 16 Mio. ha. Legt man durchschnittliche Erträge von 5500 l/ha bei Ethanol und 1500 l/ha Biodiesel zugrunde, was in Anbetracht der Verteilung der Erzeugungsstandorte (siehe oben) vielleicht eher eine Überschätzung der realisierten Erträge bedeutet, so errechnet sich auf der Grundlage der oben genannten Erzeugungsmengen aktuell ein Flächenbedarf von ca. 30 Mio. ha.

Zur Einordnung dieser Zahlen ist von Bedeutung, dass einerseits auf diesen Flächen bzw. bei der Energieerzeugung Nebenprodukte in erheblichem Umfang anfallen (vor allem Eiweißfuttermittel), dass aber andererseits auch der Energieeinsatz für die Produktion und die Konversion zu berücksichtigen ist, um von Bruttoerträgen zu Nettoerträgen zu gelangen.

Zur Frage, wie stark sich das Segment „Bioenergie vom Acker“ im weltweiten Maßstab ausdehnen könnte, gibt es in der wissenschaftlichen Literatur stark divergierende Einschätzungen.

Das Spektrum der Einschätzungen über zusätzlich nutzbare Ackerflächen reicht, wie der umfassende Überblick von KAMPMAN et al. (2008) gezeigt hat, von 0 bis 1,5 Milliarden ha, in Einzelfällen sogar noch darüber hinaus. In jenen Studien, die am oberen Ende der Skala rangieren, werden große technische Fortschritte bei der Nutzung vormals unproduktiver Flächen angenommen, außerdem eine Zurückdrängung der Weidewirtschaft zugunsten der Stallhaltung, um auf den ehemaligen Weiden ertragreicheren Ackerfutterbau zu betreiben. Der Aspekt „Umwandlung von Weide- in Ackerland“ ist insofern von großer Bedeutung, als weltweit ungefähr 3,5 Mrd. ha Weideland genutzt werden und die Zukunftsperspektive dieser Flächen sowohl unter Produktivitäts- als auch unter Klimaschutz- und Biodiversitätsaspekten sehr kontrovers diskutiert wird.

Übereinstimmend weisen alle Studien darauf hin, dass eine wesentliche Expansion der Agrarerzeugung vor allem in Südamerika und Sub-Sahara-Afrika erfolgen könnte. In allen anderen Weltregionen sind die Expansionspotenziale, gemessen am Energiehunger der Welt, äußerst begrenzt. COTULA et al. (2008) gehen davon aus, dass in Afrika und Südamerika noch Flächen in der Größenordnung von 1 Mrd. ha vorhanden sind, die bezüglich ihrer landwirtschaftlichen Eignung in die Kategorie „gut oder sehr gut geeignet“ gehören und derzeit noch nicht genutzt sind. FISCHER et al. (2002) sowie ALEXANDRATOS und BRUINSMA (2012) gehen von einer ähnlichen Größenordnung aus; zugleich legen sie ausführlich dar, wie groß die Unsicherheiten bezüglich des tatsächlichen nutzbaren Anteils dieser Flächen sind. Andere Quellen sind bezüglich der noch nutzbaren Landreserve allerdings wesentlich zurückhaltender; sie verweisen auf Restriktionen im sozioökonomischen, rechtlichen und politischen Bereich (Eigentumsrechte; politische Stabilität) sowie im umweltpolitischen Bereich (Biodiversität), außerdem auf den fortlaufenden Verlust an Ackerflächen durch Versiegelung, Versalzung, Erosion oder die Folgen des Klimawandels (*Foresight* 2011, *Leopoldina* 2012).

Das Spektrum der Einschätzungen über die Energieerträge, die auf den zusätzlichen Ackerflächen zu erzielen wären, ist ähnlich breit. So kommen beispielsweise HOOGWIK et al. (2003) in ihrem optimistischen Szenario für 2050 zu einem zusätzlichen globalen Biomasse-Energiepotenzial von fast 1000 EJ, welches auf einer zusätzlichen Flächenbasis von ca. 2,6 Mrd. ha erzeugt werden soll. Daraus errechnet sich ein angenommener jährlicher Energieertrag von ca. 380 GJ/ha. Zum Vergleich: Die derzeit in Deutschland gängigen Bioenergielinien liegen überwiegend bei einem jährlichen Nettoenergieertrag von deutlich unter 100 GJ/ha (*WBA* 2008). Folgt man den Klassikern der ökonomischen

Theorie (SMITH 1776, RICARDO 1817, THÜNEN 1826), so ist es plausibel anzunehmen, dass bei steigender Biomassenachfrage die künftig in Kultur genommenen Flächen eher unterdurchschnittliche Erträge aufzuweisen haben. Offenbar besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf, um zu realistischen Einschätzungen zu gelangen.

Nehmen wir – grob vereinfachend – an, (a) der durchschnittliche Nettoenergieertrag je Hektar betrage weltweit 100 GJ/ha, liege also im oberen Bereich des derzeit für Deutschland erreichten Niveaus,³ und (b) die künftigen Ertragssteigerungen auf den bereits genutzten Agrarflächen werden für die Deckung der steigenden Nahrungsmittelnachfrage benötigt, so wären 40 bis 50 Mio. ha landwirtschaftlich genutzte Fläche zusätzlich erforderlich, um einen Prozentpunkt der Weltenergieerzeugung (364 Mrd. GJ Endenergiebedarf, 532 Mrd. GJ Primärenergieproduktion) durch ackerbaulich erzeugte Biomasse decken zu können.

Wenn wir uns nun in Erinnerung rufen, dass die globale Ackerfläche in den vergangenen 50 Jahren nur um ca. 100 Mio. ha ausgedehnt wurde, so erscheint das Potenzial der ackerbaulichen Biomasseerzeugung sehr begrenzt. Folgen wir jenen Analysen, die eine Expansion um bis zu 1 Mrd. ha für möglich halten, so errechnet sich für die Bioenergie vom Ackerland ein globales Potenzial in der Größenordnung von 20 bis 25% des Weltenergiebedarfs.

Die Erfahrung des vergangenen Jahrzehnts hat gezeigt, dass die globale Landwirtschaft durchaus imstande war, eine begrenzte Zusatznachfrage nach Bioenergie zu verkraften, allerdings teilweise auf Kosten zusätzlicher Umweltbelastungen. Im Getreidebereich kam der mit Abstand stärkste Nachfrageimpuls aus der starken Expansion der US-Ethanolproduktion. Diese Zusatznachfrage sorgte dafür, dass im Ethanolsegment am Ende des Jahrzehnts ungefähr 100 Mio. t Mais mehr verbraucht wurden als am Anfang des Jahrzehnts, als dieses Segment noch kaum existierte. Die globale Getreideerzeugung (ohne Reis) stieg im gleichen Zeitraum jedoch um ungefähr 350 Mio. t an (von ca. 1,45 auf ca. 1,8 Mrd. t) (USDA versch. Jgg.). Der zusätzliche Verbrauch von Mais für Ethanol machte also weniger als ein Drittel des weltweiten Gesamtzuwachses aus, weil andere Einflussgrößen (Bevölkerungswachstum, Ausdehnung der Viehhaltung) noch bedeutsamer waren. Eine eingehende Analyse der Anpassungen, die die US-Landwirtschaft während dieses Jahrzehnts vollzogen hat, führte zu dem Ergebnis, dass die zusätzliche Maisproduktion durch vielfältige einzelbetriebliche Maßnahmen zustande kam. Hierzu gehörten unter anderem Ertragssteigerungen, Zurückdrängung anderer Fruchtarten wie z. B. Baumwolle, Einführung von Doppelanbau (*double cropping*) an dafür geeigneten Standorten und die Ausdehnung der ackerbaulichen Nutzung auf ehemalige Grünland- und Naturschutzflächen (WALLAN- DER et al. 2011)

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die landwirtschaftlich erzeugte Bioenergie nur ein begrenztes Potenzial zur Deckung des globalen Energiebedarfs aufweist. Dass der Energiepflanzenanbau von seinem derzeitigem Niveau (unter 1% des EEV) in absehbarer Zeit in die Nähe der 10%-Marke vorstoßen könnte, erscheint wenig wahrscheinlich. Die Politik sollte bedenken, dass sie durch die Festlegung allzu ehrgeiziger Bioenergieziele die Leistungsfähigkeit der Weltagrarwirtschaft schnell überfordern kann. Die dann eintretenden Preissteigerungen stellen zwar einerseits einen Entwicklungsanreiz dar, der auch der Landwirtschaft und den ländlichen Regionen in Entwicklungsländern nützt, doch bergen

3 Vgl. WBA 2008.

sie andererseits auch zusätzliche Risiken für die Welternährung. Diese Chancen und Risiken sind räumlich nicht gleichverteilt, d. h. in einigen (z. B. flächenarmen) Regionen kann sich die Ernährungslage dramatisch zuspitzen, während sich in anderen (z. B. flächenreichen) Regionen die Einkommens- und Ernährungslage verbessert. Per Saldo überwiegen nach derzeitigem Einschätzungsstand die Risiken für die Welternährung (*WBA* 2008, *EIDE* 2008, *WBA* 2012).

Wesentlich größere Potenziale für die Energieversorgung könnte eventuell die Forstwirtschaft haben. Ihr Beitrag zur Bioenergie übersteigt den Beitrag der Landwirtschaft gegenwärtig um mehr als das Zehnfache. Angesichts einer globalen Waldfläche von ca. 4 Mrd. ha (*FAOSTAT*), nicht vorhandener Nutzungskonkurrenz zu den Nahrungsmitteln und erheblicher Produktivitätsreserven beispielsweise in der Forstpflanzenzüchtung lässt sich hier – zumindest kalkulatorisch und natürlich auch nur in einer sehr langfristigen Perspektive – ein beachtliches Biomassepotenzial ermitteln. Wie groß dieses Potenzial tatsächlich ist und wie groß die Risiken wären, die eine zunehmende Ausschöpfung des Potenzials mit sich brächte, ist allerdings noch wenig erforscht und wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert (*KAMPMAN* et al. 2008, *Leopoldina* 2012).

4. Bewertung der Bioenergiepolitik

Seit Jahrtausenden nutzen die Menschen Biomasse in Form von Holz zur Wärmeproduktion, und im vorindustriellen Zeitalter war Biomasse in Form von Stroh, Heu und Getreide auch von zentraler Bedeutung für die Mobilität (z. B. Ochsenanspannung, Pferdefuhrwerke). Erst im vergangenen Jahrhundert wurde die Energiegewinnung zur Gewährleistung von Mobilität weitgehend auf fossile Brennstoffe umgestellt, und auch die Strom- und Wärmeerzeugung vollzieht sich inzwischen überwiegend auf Basis fossiler Energieträger.

Eine (zunächst kleine) Trendwende zurück zur Bioenergiegewinnung von Ackerflächen wurde in den 1970er Jahren eingeleitet, als Brasilien damit begann, die Erzeugung und Verwendung von Ethanoltreibstoff auf Basis von Zuckerrohr zu fördern. Zwei Jahrzehnte später erhielt die Biokraftstoffherstellung zusätzliche Impulse, die zum einen von Mitteleuropa (Biodiesel auf Rapsbasis) und zum anderen von den USA (Ethanol auf Maisbasis) ausgingen. Anfang des vergangenen Jahrzehnts kam dann speziell in Deutschland die Förderung der biogenen Stromerzeugung (Biogas auf Maisbasis) hinzu. Diese vier Hauptschübe, die durch zahlreiche kleinere Schübe in verschiedenen Erdteilen ergänzt wurden, sind ausnahmslos auf politische Interventionen zurückzuführen.

Die Politik begründet diese Interventionen in den Marktmechanismus mit sehr unterschiedlichen Zielen bzw. Argumenten. Die wichtigsten lassen sich mit folgenden Schlagworten umreißen: Anschubförderung, Speichermöglichkeit, Versorgungssicherung, Klimaschutz, Förderung ländlicher Räume. Im Folgenden soll zu den verschiedenen Argumentationslinien Stellung genommen werden (vgl. ausführlich: *WBA* 2008).

4.1 Das Argument „Anschubförderung“

Der Kern dieser Begründung lautet: Die Politik leistet mit ihrer Förderung der Bioenergie lediglich einer Entwicklung Vorschub, die sich bei der bevorstehenden Umstellung der Weltwirtschaft auf regenerative Energieträger ohnehin vollziehen wird. Indem nationale

Regierungen dies tun, beschleunigen sie die Umstellung auf regenerative Energien (mit positiven Wirkungen für den Klimaschutz, siehe unten) und helfen zugleich den geförderten nationalen Wirtschaftszweigen, sich für den globalen Zukunftssektor „regenerative Energien“ besonders wettbewerbsfähig aufzustellen.

Diese Begründung erscheint auf den ersten Blick einleuchtend. Insbesondere die „Erfolgsstory“ der Windenergie scheint zu belegen, dass dieser Weg auch in der Praxis funktioniert: Die Anschubförderung hat dazu geführt, dass die Produktionskosten für Windstrom in den vergangenen zwei Jahrzehnten auf weit unter 50% des Ausgangswertes gesunken sind und inzwischen die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber der Stromerzeugung aus fossilen Energiequellen in Sichtnähe ist. Entsprechende „Lernkurven“ werden auch für die Solarthermie erwartet, wobei dort eine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber fossilen Energieträgern vermutlich nur erreicht werden kann, wenn die Anlagen an sonnenreichen Standorten in Südeuropa oder Nordafrika errichtet werden (PSI 2004, CZISCH et al. 2005). Wenn diese Prinzipien bei Wind- und Solarenergie funktionieren, weshalb dann nicht auch bei der Bioenergie?

Grundsätzlich gilt natürlich auch hier, dass solche Energielinien, die mit Hilfe politisch verfügbarer Anschubförderung über die Rentabilitätsschwelle gehoben werden und sich so im Markt verbreiten können, einen stärkeren privatwirtschaftlichen Innovationsschub erhalten und deshalb im Laufe der Zeit stärkere Produktionskostensenkungen erfahren als andere Energielinien, die nicht im Markt etabliert werden und somit allein auf staatliche Forschungs- bzw. Forschungsförderaktivitäten angewiesen sind. Die Lernkurven existieren also im Prinzip auch bei der Bioenergie.

Die entscheidenden Fragen lauten jedoch: Wird das ausreichen, um einigen (oder gar allen) Bioenergielinien auf Dauer den Weg in die Wettbewerbsfähigkeit zu ebnen? Und falls ja: Welche Linien lohnt es sich anzuschieben?

Die Europäische Union (EU) ging ursprünglich davon aus, dass auch in der EU die Bioethanol- und die Biodieselproduktion ohne politische Unterstützung wettbewerbsfähig werden könnten, wenn die Erdölpreise weiter ansteigen (European Commission 2005). Hierbei wurde allerdings nicht bedacht, dass sich die Agrarpreise an den Erdölpreis ankopeln, d. h. die Rohstoffkosten der Bioenergieanlagen mit zunehmendem Erdölpreisniveau immer weiter ansteigen (vgl. Kapitel 2). Die Einschätzung der Kommission hat sich daher als Fehleinschätzung herausgestellt; der Erdölpreis hat die damals kalkulierte Rentabilitätsschwelle längst erreicht, aber die Biokraftstoffherzeugung ist nach wie vor nicht wettbewerbsfähig, weil der Preisanstieg für die agrarischen Rohstoffe die Produktionskosten erhöht hat. Auch für die Zukunft ist zu erwarten, dass die Ankopplung der Agrar- an die Erdölpreise die Expansion der Bioenergie bremst und dafür sorgen wird, dass sich die Bioenergie bei weiter steigendem Energiepreisniveau nicht überall durchsetzt, sondern nur an den bestgeeigneten Standorten und in den bestgeeigneten Bioenergielinien.

Die deutsche Politik hat sich bisher um die Frage, welche Bioenergielinien am Standort Deutschland zu Marktpreisen wettbewerbsfähig werden könnten, schlicht herumgedrückt. Stattdessen hat sie das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) so konstruiert, dass alle dort geförderten Energielinien mit Hilfe differenzierter Einspeisevergütungen über die Rentabilitätsschwelle gehoben werden – je schwächer die Rentabilität ohne Förderung ausfällt, desto höher das Subventionsäquivalent je kWh.

Das Prinzip „alle Linien fördern“ könnte sinnvoll sein, wenn man entweder (a) von der Annahme ausgeht, im postfossilen Zeitalter hätten alle regenerativen Energien ihren Platz und könnten sich früher oder später im Wettbewerb behaupten, und/oder (b) von der

Annahme, die möglichen Fortschrittsraten bei den verschiedenen regenerativen Energielinien ließen sich noch nicht einmal annähernd einschätzen, so dass es geboten sei, alle Linien zu fördern und dadurch dem Zufall eine möglichst große Chance zu geben. Wie plausibel sind diese Annahmen?

Würde die Politik sich tatsächlich von der Annahme (b) leiten lassen („unprognostizierbare Fortschritte“), so käme dies einem Armutszeugnis für das Wissenschaftssystem und insbesondere für die politikberatende Forschung gleich. Ganz so arm ist die Forschungslandschaft zum Glück nicht; immerhin gibt es doch einige Publikationen, in denen Forschergruppen versucht haben, vergleichende Einschätzungen über die Fortschrittspotenziale verschiedener Energielinien zumindest näherungsweise abzugeben.⁴ In der Summe führen diese Projektionen zu der Einschätzung, dass sich die Solar- und die Windenergie im Laufe der kommenden Jahrzehnte tendenziell stärker in den Vordergrund drängen werden, während die relative Bedeutung der Bioenergie schrumpft. Für die Energieversorgung Deutschlands geht z. B. die „Leitstudie 2008“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) davon aus, dass die energetische Nutzung von Biomasse nach 2020 kaum noch ansteigen wird, während in den folgenden Jahrzehnten Solarenergie, Geothermie und Windenergie immer größere Bedeutung erlangen.⁵

Die Anzahl und das methodische Fundament solcher Studien sind jedoch begrenzt. Man kann es auch drastischer ausdrücken: Wenn man bedenkt, wie wichtig es wäre, mit Hilfe belastbarer (und zwischen den Energielinien vergleichbarer) Abschätzungen künftiger Produktionskostenentwicklungen die erfolgsträchtigen Pfade zu erkennen und Milliarden-Fehlinvestitionen zu vermeiden, dann ist das Defizit an solchen Analysen eklatant. Insbesondere mangelt es an Analysen, die sowohl die technologisch-betriebswirtschaftlichen Perspektiven beleuchten als auch Mengenpotenziale, marktwirtschaftliche Wechselwirkungen und internationalen Wettbewerb. Solche umfassenden Analysen, welche die verschiedenen Energielinien im Vergleich betrachten und auf diese Weise ein belastbares Fundament zur Selektion der aussichtsreichen Energielinien bilden, gibt es kaum. Stattdessen finden sich hunderte Publikationen, in denen sich die „Anhänger“ der einen oder der anderen Technologie mit Heilsversprechen und isolierten Potenzialabschätzungen für ihre jeweiligen Favoriten zu Wort melden. An diesem Defizit ist die Politik nicht schuldlos. Anstatt gleich mit Milliardenbeträgen in die Förderung einzelner Energielinien einzusteigen, wäre es sinnvoller gewesen, zunächst einmal einige Millionen Euro in die Entwicklung eines belastbaren „Business-Plans“ zu investieren.⁶

Wie verhält es sich nun mit der Annahme (a) („alle Energielinien werden ihren Platz haben“), die ja ebenfalls eine Pauschalförderung aller regenerativen Energielinien ohne vorherigen Business-Plan rechtfertigen könnte? Auch diese Annahme gilt es kritisch zu hinterfragen. Zwar zeichnet die deutsche Politik gern das Bild, es bedürfe einer breiten Palette regenerativer Energieträger, um im postfossilen Zeitalter den großen Energiehunger der deutschen Volkswirtschaft stillen zu können, und selbst bei vollständiger Nutzung dieser breiten Palette seien radikale Energieeinsparungsmaßnahmen vermutlich unverzichtbar. Doch ist es unwahrscheinlich, dass dieses Bild die energiewirtschaftliche Realität am Ende unseres Jahrhunderts zutreffend abbildet.

4 Vgl. *WBA 2008* und die dort angegebene Literatur.

5 Vgl. NITSCH 2008.

6 Vgl. ISERMEYER und ZIMMER 2006.

Das Bild wäre vielleicht zutreffend, wenn sich die deutsche Politik dauerhaft dem Dogma verschriebe, die künftige Energieversorgung des Landes müsse unbedingt durch inländische regenerative Energiequellen sichergestellt werden. Doch warum dieses Dogma, und wie wahrscheinlich ist es, dass sich die Politik daran hält?

Im fossilen Zeitalter hat Deutschland die Energieversorgung seiner Volkswirtschaft durch Importe aus einer relativ kleinen Zahl von Lieferländern sichergestellt; im post-fossilen Zeitalter gibt es eine weitaus größere Zahl von Ländern, aus denen regenerative Energie bezogen werden könnte. Viele dieser Länder haben weitaus günstigere Voraussetzungen, um Wind- und insbesondere Solarenergie kostengünstiger und ressourcensparender zu erzeugen als Deutschland. Insgesamt wird regenerative Energie im post-fossilen Zeitalter überhaupt nicht knapp sein; die Sonne schenkt uns 8000-mal mehr Energie als die gesamte Weltbevölkerung benötigt, und allein mittels Solarthermie ließe sich auf 5 % der Saharafläche der gesamte Energiebedarf der Weltwirtschaft decken (PSI 2004).

Bei dieser Ausgangslage ist nicht zu erwarten, dass ein international verflochtenes marktwirtschaftliches System dauerhaft einen Zustand anstrebt, bei dem kostengünstige und weniger kostengünstige Energieträger parallel ihren Platz finden. Stattdessen gilt: Sofern es möglich ist, das kostengünstigste regenerative Energieversorgungssystem zu geringen Grenzkosten immer weiter auszudehnen, wird sich dieses System schrittweise gegenüber allen anderen Systemen durchsetzen.

Auch wenn die Politik gern das Ziel einer „regionalen Selbstversorgung“ mit einem „breiten Mix“ regenerativer Energiequellen proklamiert, so ist doch festzustellen, dass sie diese Linie schon in der Frühphase der Bioenergiepolitik verlassen hat. So gilt beispielsweise für Biodiesel, dass der in Deutschland verbrauchte Kraftstoff zu einem großen Teil importiert bzw. aus importierten Agrarrohstoffen hergestellt wird. Wichtiger noch: Alle wesentlichen Förderpolitiken für regenerative Energien wurden inzwischen von Produktionsförderung auf die Verbrauchsförderung umgestellt (Beimischungsgebote und Einspeisevergütungen). Es liegt in der Natur solcher verbrauchsorientierten Regelungen, dass sich die Produktion der Rohstoffe im Laufe der Zeit an die kostengünstigsten Standorte (unter Berücksichtigung von Produktions- und Transportkosten) verlagert. Vermutlich wäre eine andere Politiklösung auch kaum dauerhaft durchzuhalten, denn die Gewährleistung eines möglichst ungehinderten Außenhandels ist das Kernziel der internationalen Handelspolitik und liegt ganz im Interesse der exportorientierten deutschen Volkswirtschaft.

Derzeit ist es noch zu früh, mit Sicherheit vorhersagen zu können, welches der regenerativen Energieversorgungssysteme in welcher Region am Ende die Nase vorn haben wird. Die bisher vorliegenden Erkenntnisse deuten allerdings klar darauf hin, dass die Bioenergie auf der Basis der Ackerflächen im postfossilen Zeitalter wahrscheinlich nicht das Rückgrat der globalen Energiewirtschaft bilden wird, sondern allenfalls einige – möglicherweise für den Einzelfall bedeutsame – Nischen des Energiesektors bedienen wird. Die besten Chancen, im „Mainstream“ der postfossilen Energieversorgung Europas vorn zu liegen, haben nach derzeitigem Erkenntnisstand die direkte Umwandlung von Wind- und Solarenergie in Elektrizität (evtl. auch Wasserstoff) und der Stromtransport von den bestgeeigneten Erzeugungsstandorten (Sonne im Süden, Wind im Nordwesten) in die

Bevölkerungszentren der EU.⁷ Weshalb die Biomasse von Ackerflächen für den globalen „Mainstream“ der regenerativen Energieversorgung voraussichtlich nicht in Betracht kommt, wurde in den Kapiteln 2 und 3.3 herausgearbeitet: Selbst bei hohen Erdölpreisen wird die globale Ausdehnung der Bioenergieerzeugung nur langsam vorankommen, weil die Expansionspotenziale der Ackerfläche begrenzt sind, sich deshalb die Agrarrohstoffpreise an den Erdölpreis ankoppeln (vgl. Kapitel 2) und die Produktionskosten der Bioenergie nach oben ziehen. Die Begrenztheit der globalen Ackerfläche und die Flächennutzungskonkurrenz zum Nahrungsmittelsektor stellen somit auf lange Sicht den entscheidenden Nachteil der Bioenergie gegenüber anderen regenerativen Energieträgern (vor allem Wind und Solar) dar.

Wie sehr sich die Wettbewerbsverhältnisse innerhalb des Segments der regenerativen Energieträgern verschieben können, zeigte sich in den vergangenen 15 Jahren in der Evolution des EEG: Während die Einspeisevergütungen verschiedener anderer Energielinien (z. B. Fotovoltaik) in den vergangenen 20 Jahren deutlich abgesenkt werden konnten, war dies infolge der stark gestiegenen Agrarrohstoffkosten bei Biogas nicht möglich.

Fazit: (a) Es gibt Zweifel, ob die Erzeugung von Bioenergie auf Ackerflächen am Standort Deutschland jemals wettbewerbsfähig wird. (b) Es gibt noch keine Vorstellung darüber, welche der verschiedenen Bioenergie-Optionen am ehesten die Chance auf nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit am Standort Deutschland hätte. (c) Gemessen an dieser unsicheren Ausgangsbasis ist der (mit Milliardenbeträgen subventionierte) Verbreitungsgrad einiger Bioenergielinien (Biodiesel, Biogas) schon sehr hoch, während andere Linien (z. B. Agrarholz) bisher wesentlich weniger Unterstützung erfuhren. (d) Es sollte erwogen werden, vor einer weiteren Ausdehnung der Bioenergieförderung zunächst einmal in die Erarbeitung eines überzeugenden Business-Plans für den Sektor zu investieren.

4.2 Das Argument „Speicherfähigkeit“

Kurz- und mittelfristig hat die Bioenergie (z. B. Holz, Biogas) gegenüber der Wind- und Solarenergie den großen Vorteil, dass sie gut speicherfähig ist. Dieser Vorteil wird jedoch im Laufe der Zeit schwinden, weil (a) verbesserte Speichertechnologien entwickelt werden und (b) grenzüberschreitende Stromnetze errichtet werden, welche einen Ausgleich der Schwankungen im regionalen Solar- und Windstromangebot ermöglichen.

Es ist zu erwarten, dass die Umstellung auf eine an Stromleitungen gebundene Energieversorgung im Mobilitätssektor auf größere Schwierigkeiten stößt als in den anderen Wirtschaftssektoren. Im Nahverkehr werden sich diese Schwierigkeiten noch relativ leicht überwinden lassen (z. B. Elektrobusse), und auch im Individualpersonenverkehr über weite Distanzen steht die Elektromobilität vor keinen unüberwindlichen Hindernissen. Die Umstellung des Schwerlastverkehrs und des Schiffsverkehrs wird jedoch vermutlich mehr Zeit benötigen, und im Segment Luftverkehr könnte es sogar dazu kommen, dass biobasierte Flüssigkraftstoffe auf Dauer die leistungsfähigste Energiequelle bleiben.

Wie soll die Politik mit dem Argument umgehen, langfristig werde Biokraftstoff vermutlich nur für den Luftverkehrssektor unverzichtbar sein, während in anderen Sektoren andere regenerative Energieträger schrittweise die Oberhand gewinnen? Soll dann jetzt

⁷ Vgl. OECD 2007, WBA 2008, NITSCH 2008.

schon der Einsatz von Bioenergie vor allem in Richtung auf den Luftverkehr gelenkt werden?

Nein, das wäre nicht sinnvoll. Es ist zu erwarten, dass Erdöl bei zunehmender Verknappung allein durch die Marktkräfte immer stärker in jene Marktsegmente gelenkt werden wird, in denen es besonders schwer zu substituieren ist. Für jene Segmente (z. B. Luftverkehr) werden die schrumpfenden Fördermengen noch viele Jahrzehnte lang ausreichen. Volkswirtschaftlich ist es effizienter, die Substitution von Erdöl durch regenerative Energieträger zunächst einmal dort vorzunehmen, wo dies besonders kostengünstig möglich ist (z. B. beim Heizöl), als bereits jetzt die Substitution in einem Segment vorzunehmen, wo sie besonders teuer ist (z. B. beim Flugbenzin). Jenes Segment würde dann noch auf Jahrzehnte hinaus auf Erdöl angewiesen sein, und die Vorbereitung auf das postfossile Zeitalter würde dann sinnvollerweise nicht darin bestehen, jetzt schon Bio-Flugbenzin in großen Mengen „herbeizusubventionieren“, sondern mit Hilfe der Forschungs- und Technologiepolitik die technologischen Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass eines Tages ein leistungsfähiger (eventuell biogener) Kraftstoff für Flugzeuge bereitsteht.

Wie soll die Politik mit dem Argument umgehen, die subventionierte Ausbreitung der Bioenergie sei erforderlich, weil die wetter- und tageszeitbedingten Angebotsschwankungen der stark expandierenden Wind- und Solarenergie nur durch Bioenergie ausgeglichen werden können?

Wie bereits festgestellt, sind Holz und Biogas gut speicherbar und haben somit das Potenzial, als kurzfristig regelbare Energieträger zum Ausgleich der Angebotsschwankungen anderer Energieträger eingesetzt zu werden. Allerdings müssen Biogasanlagen hierfür um zusätzliche Gasspeicher und Verstromungskapazitäten erweitert werden. Die Kosten für solche Erweiterungen von Biogasanlagen liegen im Bereich von 3 ct/kWh. Derzeit steht diesen Mehrkosten ein zusätzlicher Stromerlös in Höhe von 1–2 ct/kWh gegenüber, so dass die Zusatzinvestition noch nicht rentabel wäre (*WBA* 2011). Nun wird argumentiert, die Nachfrage nach biogener regelbarer Energie werde mit dem Ausbau der Solar- und Windenergie steigen, so dass sich auch die Preisrelationen zugunsten der zusätzlich erforderlichen Bioenergie verändern müssten. Dieses Argument ist aber nicht überzeugend, denn solange fossiles Erdgas als Ausgleichsenergie verfügbar ist, wird die Marge für die Ausgleichsenergie durch die Grenzkosten der Gasspeicherung und -verstromung im fossilen Bereich bestimmt. Die Höhe des künftigen Gaspreises spielt hierbei keine Rolle, sondern es geht ausschließlich um die Preisdifferenz zwischen den verschiedenen Lastarten – und hier ist kaum zu erwarten, dass die Speichertechnologie im Biogasbereich sich grundsätzlich günstiger entwickelt als die Speichertechnologie im Erdgasbereich.

Erdgas steht noch für einige Jahrzehnte zur Verfügung, nicht jedoch auf Dauer, und auch die Kohlevorräte werden in wenigen Jahrhunderten zur Neige gehen. In der langfristigen Perspektive ist es deshalb von größter Bedeutung, wie leistungsfähig (a) die Speichertechnik und/oder (b) der EU-weite Verbund der Stromleitungsnetze entwickelt werden. Je besser dies gelingt, desto stärker wird der Speicherbarkeit-Vorteil der Bioenergie entwertet. Die Umstellung der Energiewirtschaft wird sich bis zum Ende des Jahrhunderts hinziehen, für diesen Zeitraum werden ausreichende Mengen fossiler Energieträger bereitstehen. Daher spricht viel für die Annahme, dass bis dahin die überregionalen Leitungsnetze und/oder die Speichertechnik ausreichend entwickelt sein werden, um auf (relativ kostspielige) Bioenergie als Ausgleichsenergie verzichten zu können.

4.3 Das Argument „Versorgungssicherheit“

Es wurde bereits herausgearbeitet (siehe Kapitel 3.2), dass die in Deutschland verfügbaren Ackerflächen das Angebotspotenzial der nationalen Bioenergieerzeugung eng begrenzen. Derzeit liegt der Beitrag zum Endenergieverbrauch bei ca. 2,5 %, und selbst bei einer weiteren starken Ausdehnung ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein Versorgungsbeitrag von über 10 % erreicht werden könnte – und wenn er erreicht würde, dann nur um den Preis einer drastischen Unterversorgung bei Nahrungsmitteln. Bildlich ausgedrückt: An einer Seite ist dieses Tischtuch immer zu kurz.

Des Weiteren wurde herausgearbeitet, dass die Politik kaum Möglichkeiten hat, dieses Tischtuch nach eigenem Gutdünken zu platzieren, d. h. in planwirtschaftlicher Weise eine weitere Steigerung der nationalen Produktion von Bioenergie (zulasten der Nahrungsmittelerzeugung) anzuordnen. Sie hat sich, auch unter dem Druck der handelspolitischen Gepflogenheiten, im Wesentlichen auf die Förderung der Verwendung von Bioenergie festgelegt. Bei dieser Ausrichtung der Förderpolitik entscheiden die Unternehmen, was wo produziert wird, und im konkreten Fall ist hier zu erwarten, dass die Importanteile im Bioenergiesektor rasch ansteigen werden, wenn die Politik immer ehrgeizigere Verwendungsziele festlegt.

Diese marktwirtschaftliche Anpassung in Richtung auf steigende Importanteile tritt vor allem bei solchen Bioenergielinien ein, die auf gut transportablen Agrarrohstoffen beruhen (z. B. Biodiesel auf Raps- oder Sojabasis). Wenn der Politik daran gelegen sein sollte, den Importanteil gering zu halten, so müsste sie sich auf die Förderung von Strom aus Biogas auf der Basis von Maissilage konzentrieren. Zwar handelt es sich auch hier um eine Verwendungsförderung, so dass im Prinzip auch ausländische Rohstoffherkünfte zum Zuge kommen könnten, doch stehen die Produkteigenschaften der Maissilage einem überregionalen Transport entgegen. Deshalb erfolgt hier – entsprechend hohe Fördersätze vorausgesetzt – *de facto* eine Förderung der Energieerzeugung in der Verwendungsregion. Andererseits: Es ist vermutlich nur eine Frage der Zeit, bis verbesserte Möglichkeiten des internationalen Stromtransfers dafür sorgen, dass auch beim Biogasstrom ausländische Agrarregionen in den vollen Genuss einer deutschen Verwendungsförderung kommen, ohne dass Agrarrohstoffe über größere Distanzen bewegt werden müssen.

Insgesamt ist hinsichtlich des Ziels „Versorgungssicherheit“ zusammenzufassen, dass sich selbst mit drastisch verstärkten Förderpolitiken nur sehr begrenzte Zielbeiträge der Bioenergie zur nationalen Energieversorgung erreichen lassen, und diese auch nur um den Preis einer entsprechend verringerten Versorgungssicherheit bei Nahrungsmitteln.

Dieses Ergebnis gilt allerdings nur dann, wenn man ausschließlich „nationale Herkünfte“ als „versorgungssicher“ bewertet. Ist man hingegen – und daran wird die Politik angesichts der vorgelegten Zahlen wohl gar nicht vorbeikommen – bereit, auch bestimmte internationale Herkünfte als „versorgungssicher“ zu bewerten, dann eröffnet sich ein breites Spektrum interessanter Optionen. Die einfache Formel „nationale Förderpolitik = sichere Versorgung“ ist dann endgültig nutzlos, und die eigentliche Herausforderung besteht darin, Importoptionen verschiedener Energieträger aus verschiedenen Weltregionen unter dem Aspekt „Sicherheit“ zu rangieren.

Keine leichte Aufgabe, denn gewiss kann man unterschiedlicher Meinung darüber sein, ob z. B. Ethanolimporte aus Brasilien oder Palmölimporte aus Indonesien sicherer oder unsicherer sind als z. B. Kohleimporte aus Australien oder Solarstromimporte aus Süd-

spanien. Gewiss ist jedoch: Im postfossilen Zeitalter wird es eine Vielzahl von Ländern geben, in denen sich kostengünstig ein Überschuss regenerativer Energien erzeugen lässt, und in der Übergangsphase bis dahin gibt es eine Vielzahl an Ländern, die ebenfalls ein hohes wirtschaftliches Interesse daran haben, fossile Energieträger nach Europa zu verkaufen. Mit anderen Worten: Es herrscht kein Mangel an Wettbewerb, die Zahl der potenziellen Exporteure nimmt tendenziell zu, und eine große Teilmenge dieser potenziellen Exportländer ist nicht der Kategorie unzuverlässiger Lieferanten zuzuordnen.

In dieser Situation spricht vieles dafür, zunächst einmal darauf zu vertrauen, dass die vielen Entscheidungen der marktwirtschaftlichen Akteure in der Summe zu einem breiten Versorgungsportfolio führen, das unter Sicherheitsaspekten durchaus akzeptabel sein kann. Der Staat könnte sich also darauf beschränken, zum einen die überregionale Leitungsnetz-Infrastruktur sowie klimapolitisch vielversprechende Großprojekte wie *Desertec* voranzubringen, zum anderen die unzähligen privatwirtschaftlichen Entscheidungen zu verfolgen und nur dann mit zusätzlichen Leitplanken bzw. Anreizen einzugreifen, wenn die Entwicklungen unter dem Aspekt der Versorgungssicherung in eine erkennbar falsche Richtung laufen.

4.4 Das Argument „Klimaschutz“

Um die Beiträge der Bioenergiepolitik zum Politikziel „Klimaschutz“ beurteilen zu können, müssen die CO₂-Vermeidungskosten (€/t CO₂) und die CO₂-Vermeidungspotenziale (CO₂/ha) der Bioenergie ermittelt und mit anderen Klimaschutzoptionen verglichen werden. Hierzu hat der Wissenschaftliche Beirat für Agrarpolitik eine umfassende Untersuchung vorgelegt, die zu eindeutigen Ergebnisaussagen geführt hat (*WBA* 2008).

Wie die Untersuchung zeigte, weisen die verschiedenen Bioenergielinien sehr große Unterschiede hinsichtlich der Vermeidungskosten und -potenziale auf. Pauschalaussagen über die Klimaschutzwirkung „der“ Bioenergie, wie sie in der politischen Diskussion sowohl von Befürwortern als auch von Kritikern gern vorgetragen werden, sind daher problematisch. Aus klimapolitischer Sicht schneiden vor allem Holz (z. B. Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen), Stroh (sofern die Humusbilanz beachtet wird) und Biogas auf reiner Güllebasis (sofern die Anlagen nicht zu klein sind) relativ günstig ab, während Biogas auf Basis von Silomais sowie Biokraftstoffe aus heimischer Erzeugung keine überzeugenden Optionen darstellen. Für die meisten Bioenergielinien wurden CO₂-Vermeidungskosten ermittelt, die deutlich (teilweise um den Faktor 10) über den Vermeidungskosten von Klimaschutzoptionen in anderen Politikfeldern liegen (z. B. Energieeinsparung).

Hinzu kommt, dass bei einer zunehmenden Ausdehnung der Flächennutzung für Bioenergie mit steigenden Emissionen durch indirekte Landnutzungseffekte (*indirect land use change*, ILUC) zu rechnen ist, was die Treibhausgasbilanz der Bioenergie weiter verschlechtern würde (*CRUTZEN et al. 2007, OECD 2007, WBA 2008*).

Diese ILUC-Effekte traten zu Beginn der Bioenergieförderung in Deutschland und der EU kaum auf, weil die Bioenergie damals als Nutzungsmöglichkeit für Ackerflächen angesehen wurde, welche zuvor mit dem Ziel einer Agrarpreisstützung stillgelegt worden waren. Nachdem inzwischen aber die quasi-obligatorische Flächenstilllegung beendet worden ist, führt eine weitere Steigerung der Bioenergieerzeugung unweigerlich zu ILUC.

Die viel diskutierte IFPRI-Studie (AL RIFFAI et al. 2010)⁸ hat versucht, diese Effekte mit Hilfe eines umfassenden Modellansatzes zu quantifizieren, und ebenfalls verdeutlicht, dass die ILUC-Problematik bei zunehmender Ausdehnung der Bioenergie überproportional ansteigt.

Als die ILUC-bezogene Kritik an der Bioenergieförderung vor einigen Jahren aufkam, führten Politik und Wirtschaft Zertifizierungssysteme ein. Mit diesen Systemen soll sichergestellt werden, dass die verwendete Biomasse nicht auf vormaligen Waldflächen oder anderen schützenswerten Flächen erzeugt wurde. Solche Zertifizierungen mögen im Einzelfall einen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten, doch können sie die ILUC-Problematik nicht entschärfen, da sie ja nur einen eventuellen direkten Landnutzungswandel erfassen. Der indirekte Landnutzungswandel entsteht durch die nachfragebedingt erhöhten Agrarpreise, und es ist unmöglich zu verhindern, dass die Weltagrarwirtschaft an irgendeiner Stelle der Erde durch Abholzung, Grünlandumbruch oder verstärkte Düngung darauf reagiert und entsprechende Mehremissionen verursacht. Theoretisch ließe sich dies verhindern, indem die gesamte Weltagrarproduktion (*food, feed, fibre, fuel*) einer funktionsfähigen Zertifizierung unterzogen würde, doch auf absehbare Zeit wird dies reine Theorie bleiben und keinen praktischen Klimaschutz entfalten.

Ein wichtiger Aspekt, der bei der kontroversen Diskussion um die Klimaschutzwirkung der Bioenergie meist in den Hintergrund gerät, ist das Klimaschutzpotenzial. Hierzu folgendes Rechenexempel: Selbst wenn es gelänge, ein Drittel der europäischen Ackerfläche für die Bioenergie einzusetzen, könnte man damit noch nicht einmal den Anstieg der globalen Treibhausgasemissionen in einem einzigen Jahr kompensieren (*WBA* 2008). Im folgenden Jahr müsste man ein weiteres Drittel der Agrarfläche umwidmen, um dem globalen Emissionszuwachs entgegenzuwirken, und spätestens nach dem dritten Jahr hätte die EU-Landwirtschaft ihr ganzes Pulver verschossen – und überdies müssten die meisten Nahrungsmittel in die EU importiert werden. Diese Gegenüberstellung zeigt, wie groß das Treibhausproblem ist und wie begrenzt der mögliche Lösungsbeitrag der Bioenergie.

Insofern muss sich die Politik fragen, ob sie die erheblichen Aufwendungen, die derzeit zur Förderung der Bioenergie getätigt werden, unter Klimaschutzaspekten nicht in erfolgsträchtigere Bahnen lenken kann. Allein das Biogassegment in Deutschland verursacht eine Zusatzbelastung der deutschen Energieverbraucher in einer Größenordnung von 2 Milliarden Euro pro Jahr. Könnte ein so beachtlicher Finanzbetrag nicht wirkungsvoller für den Klimaschutz eingesetzt werden?

In welche Richtung der Wandel gehen müsste, hat der Wissenschaftlichen Beirat für Agrarpolitik bereits im Jahr 2008 vorgezeichnet: „Wenn es nicht gelingt, einen weltweiten Schulterchluss in der Klimapolitik zu organisieren und effektiv umzusetzen, werden sich die hochgesteckten Klimaschutzziele nicht erreichen lassen. Deshalb empfiehlt der Beirat der Bundesregierung dringend, wesentlich mehr Ressourcen in die Entwicklung einer globalen Klimaschutzstrategie zu investieren.“⁹

Nachdem die internationalen Klimakonferenzen auch seither keine substanzielle Fortschritte für den Klimaschutz erbracht haben und somit die globale Klimaschutzpolitik faktisch kurz vor dem endgültigen Aus steht, ist die Beiratsempfehlung aus dem Jahre 2008 heute dringlicher denn je.

8 IFPRI – International Food Policy Research Institute.

9 *WBA* 2008, S. 218.

4.5 Das Argument „Ländliche Räume“

Als die Bioenergieförderung in Deutschland und der EU begann, ging es aus agrarpolitischer Sicht auch darum, die im Rahmen agrarpolitischer Maßnahmen stillgelegten Ackerflächen einer sinnvollen Nutzung zuzuführen. Die Stilllegung war von der EU-Agrarpolitik eingeführt worden, um das Angebot an Agrarprodukten zu reduzieren und auf diese Weise die (als zu gering empfundenen) Agrarpreise und Agrareinkommen zu stützen.

In der damaligen Situation hatte die Erzeugung von Biomasse zur Energiegewinnung auf den stillgelegten Ackerflächen zweifellos einen positiven Effekt auf die ländliche Wirtschaft. Wie groß dieser Effekt war, lässt sich kaum abschätzen. Insbesondere in jenen Regionen, die durch landwirtschaftliche Familienbetriebe geprägt sind, dürfte die Zahl der geschaffenen Arbeitsplätze gering gewesen sein, da die vorherige Flächenstilllegung nur wenige Hektare pro Betrieb betraf und insofern keine starken Arbeitsmarktwirkungen hatte.

Inzwischen stellt sich die wirtschaftliche Situation im Agrarsektor jedoch anders dar. Die Agrarpreise haben sich insbesondere in der pflanzlichen Produktion deutlich erhöht, die Preisaussichten für die Zukunft sind tendenziell positiv, und die politisch induzierte Flächenstilllegung gehört der Vergangenheit an (vgl. Kapitel 2).

Wenn die Politik in dieser Ausgangslage die Bioenergie verbreiten will und entsprechend günstige Förderbedingungen schafft, dann kann dies zur Verdrängung der bisher etablierten Produktionszweige führen. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Politik auf der Erzeugungsseite ansetzt (z. B. mit Investitionshilfen für Landwirte). Wenn sie auf der Verwendungsseite ansetzt, sind die Verdrängungseffekte bei gut transportabler Biomasse (z. B. Raps, Biodiesel) relativ gering. Bei schlecht transportabler Biomasse (z. B. Silomais, Biomethan) können die Verdrängungseffekte jedoch erheblich sein.

Insofern war vorhersehbar, dass sich die Biogasförderung des EEG zum Stein des Anstoßes entwickeln würde. Aus Sicht der Viehhalter ist es schwer verständlich, dass die Agrarpolitik einerseits die klassischen Produktionsrichtungen liberalisiert und immer stärker dem freien Wettbewerb auf dem Weltmarkt aussetzt, andererseits aber mit der Biogasförderung eine neue Form der Preispolitik etabliert. Der staatlich festgelegte Ankaufspreis für den Biogasstrom ist dreimal so hoch ist wie der übliche Großhandelspreis.

Wissenschaftliche Analysen lassen keinen Zweifel daran, dass die Biogasförderung in den letzten Jahren zu erheblichen Umlenkungseffekten geführt hat: Die Tierproduktion wurde weniger stark ausgedehnt, als das ansonsten der Fall gewesen wäre (DE WITTE 2012). Insbesondere in den regionalen Zentren der Veredlungswirtschaft hat die Biogasförderung aber auch zu einer weiteren Verschärfung des Nährstoffüberschusses geführt. Sofern dies dazu führt, dass die Politik künftig die Rahmenbedingungen für die Tierhaltung in diesen Regionen weiter verschärft, ist die hierdurch induzierte regionale Abstockung des Viehbestandes teilweise als Spätfolge der Biogaspolitik zu werten.

Im Vergleich zu Wertschöpfungsketten, die auf Milch-, Schweine- und Rindfleischproduktion basieren, weist die Wertschöpfungskette „Strom aus Biogas auf Maisbasis“ einen deutlich niedrigeren Arbeitsplatzbedarf je Hektar aus. Ein anderes Bild ergibt sich in Ackerbauregionen; hier stellt die Stromerzeugung auf Biogasbasis eine Bereicherung des Produktportfolios dar und ist unter Arbeitsplatzaspekten eher günstig zu beurteilen (BERENZ et al. 2007).

Hinsichtlich der langfristigen strategischen Ausrichtung des Agrarsektors ist auch zu berücksichtigen, dass die Produktion von Strom oder Treibstoff nur relativ geringe Mög-

lichkeiten eröffnet, sich durch Produktdifferenzierung im Qualitätswettbewerb positiv von Mitbewerbern abzuheben. Aller Voraussicht nach wird der Energiesektor langfristig eher durch Massenproduktion, Kostenführerschaft und geringe Margen gekennzeichnet sein. Ob der deutsche Agrarsektor ausgerechnet in diese Richtung auszurichten ist oder vielleicht doch eher auf das kaufkräftige, an hochwertigen Lebensmitteln interessierte Publikum vor seiner Haustür, sollte sorgfältig durchdacht werden.

Vieles spricht dafür, anstelle der bisher geförderten „einfachen“ Energieproduktion künftig integrierte Kaskadennutzungen zu favorisieren. Dabei steht zunächst die Produktion von Nahrungsmitteln oder Grundstoffen für die Industrie im Vordergrund; von vornherein mitgedacht wird aber (a) eine effiziente energetische Nachnutzung von biogenen Reststoffen und Nebenprodukten sowie (b) ein möglichst vollständiges Recycling der in den Produkten enthaltenen sonstigen Wertstoffe.

5. Gesamtfazit: Dilemma zwischen Energie- und Nahrungspflanzen?

Wie die Analyse gezeigt hat, entsteht bei zunehmender Verknappung der fossilen Energie-reserven früher oder später eine marktwirtschaftliche Konkurrenz zwischen Energie- und Nutzpflanzen. Mit ihrer starken Förderung der Bioenergie hat die Politik diese Konkurrenzsituation zeitlich vorgezogen und zusätzlich angeheizt.

Die derzeitige Breitenförderung der Gesamtpalette der Bioenergie ist nicht überzeugend. Sie ist relativ teuer, hat eine Reihe unerwünschter Nebenwirkungen und wird letzten Endes doch nur einen geringen Beitrag zur Energieversorgung erbringen. Allzu ehrgeizige Ausbauziele für die Bioenergie drohen die Weltlandwirtschaft zu überfordern. Der bisher erreichte Stand ist hingegen verkraftbar. Nur lassen sich mit den derzeit umgewidmeten Ackerflächen erst weniger als 1% des Weltenergiebedarfs decken.

Die Politik sollte erwägen, die staatlich geförderte Verbreitung der Bioenergie künftig auf wenige Einsatzfelder zu beschränken, in denen sich Beträge zu verschiedenen Politikzielen synergistisch erreichen lassen (z. B. Agrarholz in Biotopverbundsystemen; Nutzung von Reststoffen; Nutzungskaskaden biogener Industrie Grundstoffe).

Im Übrigen kann die Umstellung der Weltwirtschaft auf regenerative Energieversorgung über andere Pfade als die Bioenergie vorgenommen werden. Das Versorgungspotenzial der anderen regenerativen Energien (vor allem Solar und Wind) ist ausreichend, sofern Importe aus sonnen- und windreichen Standorten des Auslands zugelassen werden. Der Ausbau der Leitungssysteme und die Entwicklung der Speichertechnik stellen eine Herausforderung dar, die sich im Laufe der Jahrzehnte bewältigen lassen wird.

Zu einem grundlegenden Richtungswechsel hat sich die Politik – aus welchen Gründen auch immer – bisher noch nicht durchringen können. Es mag also sein, dass sich die politischen Entscheidungsträger hier in einem Dilemma befinden; das können vielleicht die Politikwissenschaftler aufklären. Ein Dilemma zwischen Energie- und Nahrungspflanzen besteht jedoch nicht.

Literatur

- ALEXANDRATOS, N., and BRUINSMA, J.: World Agriculture towards 2030/2050, the 2012 Revision. ESA Working Paper No. 12–03. Rome: FAO 2012
- AL-RIFFAI, P., DIMARANAN, B., and LABORDE, D.: Global Trade and Environmental Impact Study of the EU Biofuels Mandate. Final Report, ATCLASS Consortium, IFPRI. Washington (DC) 2010
- BERENZ, S., HOFFMANN, H., und PAHL, H.: Konkurrenzbeziehungen zwischen der Biogaserzeugung und der tierischen Produktion. In: HEISSENHUBER, A., KIRNER, L., PÖCHTRAGER, S., und SALHOFER, K.: Agrar- und Ernährungswirtschaft im Umbruch. Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V. Bd. 42. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag 2007
- BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaft): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Hannover 2005
- Bioökonomierat: Nachhaltige Nutzung von Bioenergie. Empfehlungen des Bioökonomierats. Berlin 2011
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit): Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin 2012
- Brockhaus: Der Große Brockhaus. Wiesbaden: Brockhaus 1953
- COTULA, L., DYER, N., and VERMEULEN, S.: Fueling Exclusion? The Biofuels Boom and Poor People's Access to Land. London: IIED 2008
- CRUTZEN, P. J., MOSIER, A. R., SMITH, K. A., and WINIWARTER, W.: N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 7, 11191–11205 (2007)
- CZISCH, G., KRONSHAGE, S., und TRIEB, F.: Interkontinentale Stromverbünde – Perspektiven für eine regenerative Stromversorgung. *FVS Themen* 2001, 51–63 (2005)
- EIDE, A.: The Right to Food and the Impact of Liquid Biofuels (Agrofuels). Rome: FAO 2008
- European Commission: Biomass Action Plan. Communication from the Commission 628. Brussels: 2005
- FAO (Food and Agriculture Organization): The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Rome: FAO 2011
- FISCHER, G., VELTHUIZEN, H., SHAH, M., and NACHTERGAELE, F.: Global Agro-ecological Assessment for Agriculture in the 21. Century: Methodology and Results. Laxenburg, Austria 2002
- Foresight: The Future of Food and Farming: Challenges and Choices for Global Sustainability. London: The Government Office for Science (Ed.) 2011
- GERLING, J. P., REMPEL, H., THIELEMANN, T., und THOSTE, V.: Energie hat ihren Preis. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, BGR. *Commodity Top News* 22 (2005)
- HOOGWJK, M., FAAL, A., VAN DEN BROEK, R., BERNDEN, G., GIELEN, D., and TURKENBURG, W.: Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. *Biomass and Bioenergy* 25, 119–133 (2003)
- IEA: Key World Energy Statistics. OECD/IEA (Eds.). Paris: 2012a
- IEA: World Energy Outlook 2012. OECD/IEA (Eds.). Paris: 2012b
- ISERMAYER, F., und ZIMMER, Y.: Thesen zur Bioenergie-Politik in Deutschland. Arbeitsberichte des Bereichs Agrarökonomie Heft 2. Braunschweig: Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft 2006
- JUNKER, F., HASS, M., HUBOLD, G., KREINS, P., SALAMON, P., und SEINTSCH, B.: Potenziale einer biobasierten Wirtschaft. Braunschweig: Thünen-Institut 2012
- KAMPMAN, B., BROUWER, F., and SCHEPERS, B.: Agricultural Land Availability and Demand in 2020 – a Global Analysis of Drivers and Demand for Feedstock, and Agricultural Land Availability. Delft, CE (2008)
- Leopoldina (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften): Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Halle (Saale): Leopoldina 2012
- NITSCH, J.: Weiterentwicklung der Ausbaustategie Erneuerbare Energien. Leitstudie 2008. BMU (Ed.): Reihe Umweltpolitik. Berlin und Stuttgart 2008
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development): Economic Assessment of Biofuel Support Policies. Paris: OECD Directorate for Trade and Agriculture 2007
- PSI (Paul-Scherrer-Institut): BFE Energieperspektiven: Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen. Endbericht (Final Draft) einer Studie für das Bundesamt für Energie. Villigen (Schweiz): PSI 2004
- PETER, G., KUHNERT, H., HASS, M., BANSE, M., ROSER, S., TRIERWEILER, B., und ADLER, C.: Einschätzung der pflanzlichen Lebensmittelverluste im Bereich der Landwirtschaftlichen Urproduktion. Bericht für BMELV. Braunschweig: Thünen-Institut 2012
- REN21: Renewables 2012 Global Status Report. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (Ed.) 2012

- RICARDO, D.: Über die Grundsätze der Politischen Ökonomie und der Besteuerung. Marburg: Metropolis-Verlag 1817
- Sachverständigenrat für Umweltfragen*: Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten. Berlin: 2007
- SCHMIDHUBER, J.: Impact of increased biomass use on agricultural markets, prices and food security: a longer term perspective. Paper presented to the "International Symposium of Notre Europe". Paris 2006
- SMITH, A.: Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen. (1776) 11. Auflage. München: Deutscher Taschenbuchverlag 2005
- THÜNEN, J. H.: Der isolirte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie, oder Untersuchungen, die die Getreidepreise, der Reichthum des Bodens und die Abgaben auf den Ackerbau ausüben. Hamburg: Perthes 1826
- USDA (U. S. Department of Agriculture): World Agricultural Supply and Demand Estimates. Washington (DC): World Agricultural Outlook Board (versch. Jgg.)
- WALLANDER, S., CLAASSEN, R., and NICKERSON, C.: The Ethanol Decade: An Expansion of U.S. Corn Production, 2000–2009. EIB-79. Washington (DC); U.S. Department of Agriculture, Economic Research Research Service 2011
- WBA (Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz [BMELV]): Nutzung von Biomasse für die Energiegewinnung – Empfehlungen an die Politik. Berichte über Landwirtschaft Sonderheft 216 (2008)
- WBA (Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim BMELV): Förderung der Biogaserzeugung durch das EEG. Stellungnahme zur geplanten Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes. Berlin 2011
- WBA (Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim BMELV): Ernährungssicherung und nachhaltige Produktivitätssteigerung. Berlin: 2012
- WITTE, T. DE: Entwicklung eines betriebswirtschaftlichen Ansatzes zur Ex-ante-Analyse von Agrarstrukturwirkungen der Biogasförderung, angewendet am Beispiel des EEG 2009 in Niedersachsen. *Landbauforschung* 366 (2012)

Prof. Dr. Folkhard ISERMEYER
Präsident
Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 531 5961001
Fax: +49 531 5961099
E-Mail: folkhard.isermeyer@ti.bund.de
www.ti.bund.de

Perspektiven der Roten Gentechnik

Simone KRANER-SCHEIBER und Angelika SCHNIEKE ML* (Freising)

Mit 2 Abbildungen und 4 Tabellen



* Vortragende.

Zusammenfassung

Die Begriffe „Rote und Grüne Gentechnik“ werden hauptsächlich in deutschsprachigen Ländern verwendet. Während die Bezeichnung „Grüne Gentechnik“ sich generell auf die genetische Modifizierung von Pflanzen bezieht, ist „Rot“ indikativ für die gentechnischen Applikationen im Bereich der Biomedizin. Die meisten transgenen Nutztiere wurden bisher für biomedizinische Anwendungen generiert, wie z. B. für die Produktion von pharmazeutischen Proteinen in der Milch oder im Ei, die Generierung von Spendertieren für die Xenotransplantation und um Modelle für humane Erkrankungen zu erzeugen. Der stärkste Impetus für die Generierung gentechnisch veränderter Großtiere kommt weiterhin aus der Medizin. Jedoch bietet die gezielte Veränderung von genetischen Merkmalen oder die Einführung neuer Merkmale eine leistungsstarke Ergänzung zur traditionellen selektiven und Marker-gestützten Züchtung landwirtschaftlicher Nutztiere. Durch die Entwicklung von neuen, innovativen Technologien wie molekularen Scheren (sequenzspezifische Nukleasen) wird die genetische Veränderung des Säugetiergenoms zunehmend effizienter. Aus diesem Grund ist es an der Zeit, darüber nachzudenken, ob der Einsatz von transgenen Technologien nicht gerechtfertigt sein könnte, um die tierische Gesundheit, Produktivität und Fertilität zu verbessern, um die Umweltbelastung durch die intensive Tierhaltung zu verringern und um eventuell den Nährstoffgehalt von Lebensmitteln tierischer Herkunft zu erhöhen.

Abstract

The phrase “Rote und Grüne Gentechnik” is mainly used in German speaking countries. While the term “Grüne Gentechnik” is generally applied to genetically modified plants, red refers to applications in biomedical science. To date most transgenic livestock have been produced for biomedical applications, such as the production of pharmaceutical proteins in milk or eggs, generation of donor animals for xenotransplantation and to model human diseases. Medical priorities continue to provide the strongest impetus for transgenic technologies. But the precise alteration of existing genetic traits or the introduction of entirely new traits potentially offer a powerful adjunct to traditional selective and marker-assisted breeding in livestock agriculture. The development of radical new technologies such as molecular scissors is making genetic modification ever more efficient. Therefore, it is timely to consider whether it is appropriate to employ transgenics to improve animal health, productivity and fertility, reduce the environmental impact of intensive animal husbandry and increase the nutritional value of food products.

1. Einleitung

Der Titel dieses Artikels ist die Rote Gentechnik. Die Gentechnik umfasst ein Methodenspektrum, das die Basis für viele biotechnologische Verfahren darstellt. Daher sind Gentechnik und Biotechnologie eng miteinander verknüpft und finden Anwendung in der Grundlagenforschung, in der Industrie, Medizin, Umwelt und im Agrarbereich. Es ist nicht das Ziel dieses Artikels, diesen gesamte Bereich abzudecken, da er sich auf die Anwendung der Gentechnik bei Tieren, genauer bei Nutztieren (Kaninchen, Schwein, Rind, Ziege, Huhn) und noch spezifischer auf genetisch modifizierte Nutztiere, beschränken wird. Es werden zunächst die einzelnen Begriffe definiert, die unterschiedlichen Methoden sowie deren Vor- und Nachteile kurz beschrieben, dabei wird auf wichtige neue Technologien wie die „molekularen Scheren“ (sequenzspezifische Nukleasen) eingegangen, und es wird aufgezeigt, in welchen Bereichen zurzeit die Hauptforschungsgebiete liegen und ob es Perspektiven für gentechnisch veränderte Nutztiere gibt.

2. Die Farbenvielfalt der Biotechnologie und Gentechnik

Eine häufig verwendete und vieles umfassende Definition von Biotechnologie ist die Definition der OECD (*Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung*): „Anwendung von Wissenschaft und Technik auf lebende Organismen, Teile von ihnen, ihre Produkte oder Modelle von ihnen zwecks Veränderung von lebender oder nichtlebender Materie zur Erweiterung des Wissensstandes, zur Herstellung von Gütern und zur Bereitstellung von Dienstleistungen.“ Die dazu verwendete Technik, die Gentechnik oder Gentechnologie, beinhaltet wiederum ein ganzes Bündel an Methoden, die zur Isolierung, Charakterisierung, Veränderung von genetischem Material oder dessen Synthese notwendig sind, einschließlich der Übertragung von genetischem Material auf andere Organismen. Gentechnisch veränderte Organismen (*GVO* oder im Englischen *Genetically Modified Organism, GMO*), bei denen Fremd-DNA (*exogene DNA*) Bestandteil des eigenen Genoms wurde, werden als transgene Organismen, wie z.B. transgene Bakterien oder Tiere, bezeichnet. Wie nachfolgend beschrieben, ist es mittlerweile möglich, das Genom von Tieren oder Pflanzen experimentell zu verändern, ohne dabei ein transgenes Tier oder eine Pflanze zu generieren.

Im deutschsprachigen Raum werden die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Biotechnologie beziehungsweise Gentechnik farblich definiert (siehe Tab. 1). Rote Biotechnologie bezieht sich auf Anwendungen in der Medizin und der biomedizinischen Forschung, so z.B. die Erzeugung von rekombinanten Proteinen wie Insulin oder humanisierte Antikörper. Die Farbe Rot soll dabei angeblich für Blut stehen. Bei der Weißen oder industriellen Biotechnologie geht es um industrielle Produktionsverfahren mit Hilfe optimierter Enzyme, Zellen oder Mikroorganismen. Bei der Grünen Biotechnologie sollen Eigenschaften von Pflanzen verbessert/verändert werden, dies wird auch als Agrar- oder Agro-Gentechnik bezeichnet. Begrifflich sollte die Agro-Gentechnik auch genetisch veränderte Tiere für den Agrarbereich und die Lebensmittelproduktion mit einbeziehen. Die Abgrenzung zwischen diesen Bereichen ist oft fließend. So können beispielsweise Pflanzen gentechnisch modifiziert werden, um in ihnen Insulin (FARINAS et al. 2005) oder Antikörper (SAINSBURY et al. 2010) zu produzieren (*Rot-Grün*), oder transgene Schweine für die

Nahrungsmittelproduktion generiert werden, die weniger Phosphat ausscheiden (GOLOVAN et al. 2001), was die Umweltbelastung reduziert (*Rot-Grün-Braun*).

Tab. 1 Farbenpalette der Gentechnik

Grüne	Gentechnik:	Pflanzen/Agrarwirtschaft
Rote	Gentechnik:	Biomedizin
Weißer	Gentechnik:	Industrielle Prozesse
Blaue	Gentechnik:	Aquatische Lebensformen
Gelbe	Gentechnik:	Insekten
Braune	Gentechnik:	Umwelt
Graue	Gentechnik:	Umweltschädigung

Dieser Artikel befasst sich mit genetisch modifizierten Nutztieren mit Anwendungen im Agrarbereich, in der (Bio-)Medizin, für die Erzeugung von pharmazeutischen Proteinen oder um den Umwelteinfluss intensiver Tierhaltung zu mindern. Er deckt fast die gesamte Farbpalette der Biotechnologie ab. Alle hier angesprochenen Nutztierarten besitzen rotes Blut, somit ist der Titel *Perspektiven der Roten Gentechnik* dennoch gerechtfertigt.

3. Gentechnik bei Nutztieren: Methoden-Übersicht

Die Methoden der Gentechnik sind in der Tierzucht, Tiergesundheit, bei der Sicherung von Qualitätseigenschaften und bei der Erzeugung gesunder Lebensmittel mittlerweile unverzichtbar. Dies gilt für die Diagnose oder Behandlung von Tierkrankheiten wie z. B. den Einsatz gentechnisch hergestellter Impfstoffe. Tierzucht beruht auf den molekularbiologischen Erkenntnissen über Genvarianten und deren Auswirkungen auf Qualitätsmerkmale, und die DNA-Marker unterstützte Zucht ist mittlerweile ein Routineverfahren. Gentechnische Methoden werden angewandt, um die Qualität von Lebensmitteln tierischer Herkunft zu überprüfen, beispielsweise um zu testen, ob die Fleischlagna Rinder- oder Pferdefleisch enthält.

Die Erzeugung von genetisch modifizierten Nutztieren ist eher noch ein Nischenbereich, vor allem wenn es sich dabei um Tiere für die Lebensmittelproduktion handelt. Dennoch gab es enorme methodische Verbesserungen, und mit wenigen Ausnahmen sind fast alle Techniken der Transgenese vom Kleintier (Maus) auf das Nutztier übertragbar, wobei der Zeit- und Ressourcenaufwand beim Großtier unweigerlich höher ist.

Nahezu alle Methoden zur Erstellung transgener Tiere können in zwei Kategorien eingeteilt werden. Zum einen die direkte Transgenese, der Transfer von Fremd-DNA unmittelbar in einen Embryo. Dazu gehören die DNA-Mikroinjektion in den Vorkern einer Eizelle und der DNA-Transfer mit Hilfe von viralen Vektoren, Transposon-Vektoren oder Spermien. Zum anderen die Transgenese mit Hilfe von Zellen (Zell-vermittelte-Transgenese). Hier wird die genetische Veränderung in Stammzellen oder primären Zellen durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass man mittels homologer Rekombination gezielt und präzise ins Genome eingreifen kann (englisch: *gene targeting*). Es setzt jedoch voraus, dass man aus den verwendeten Zellen wieder ein lebendes, reproduktionsfähiges Tier erzeugen

kann. Dies wird ermöglicht entweder durch den somatischen Kerntransfer oder indem man pluripotente embryonale Stammzellen (ES-Zellen) oder induziert pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen) verwendet. Während die meisten genetisch modifizierten Großtiere zurzeit mittels Kerntransfer (Klonen) erzeugt werden, ist die Stammzelltechnologie (ES-, iPS-Zellen) die Routinemethode bei der Maus.

Neben den beiden Kategorien steht eine dritte in der Entwicklung: die Inaktivierung oder Modifizierung von Genen beziehungsweise Zielsequenzen direkt in präimplantären Embryonen mittels hochspezifischer Endonukleasen (englisch: *gene editing*). Dies ist eine relativ neue, vielversprechende, sehr effiziente Methode, die die Genommanipulation revolutionieren wird und bei Pflanzen, Fischen, Insekten und Säugetieren überall anwendbar ist. Tabelle 2 gibt eine Methodenübersicht für Kleintier (Maus) und Nutztier und zeigt, bei welchen Methoden eine gezielte Modifikation (*gene targeting* oder *gene editing*) des tierischen Genoms möglich ist.

Tab. 2 Überblick über die Methoden des „Genetischen Engineerings“ bei Maus und Nutztier

Methode	Maus	Nutztier	Gezielte Modifikation
Mikroinjektion	+	+	–
Virale Transduktion	+	+	–
Transposon-Vektoren	+	+	–
Sperma-vermittelte Transgenese	+	+	–
ES/iPS-Zellen	+	–	+
Kerntransfer	+	+	+
Molekulare Scheren	+	+	+

3.1 Direkte Transgenese

DNA-Mikroinjektion, virale Vektoren, Transposon-Vektoren: Die Injektion von DNA in den Vorkern einer befruchteten Eizelle wurde erstmals bei der Maus durchgeführt und anschließend bei Großtieren (HAMMER et al. 1985). Bis vor etwa 10–15 Jahren war die DNA-Mikroinjektion die meistgenutzte Methode zur Erzeugung transgener Nutztiere. Sie ist jedoch relativ ineffizient, nur 1–5% der lebenden Nachkommen sind transgen und – je nachdem wo im Genom das Transgen integriert hat – wird es in gewünschter Höhe exprimiert oder auch nicht. Die Entwicklung effizienterer Methoden schien eine Notwendigkeit.

Bereits seit Mitte der 1970er Jahre hat man Viren, vornehmlich Retroviren wie das *Moloney Murine Leukaemie-Virus (MMLV)*, benutzt, um transgene Mäuse zu generieren. Später erfolgte die Konstruktion viraler Vektoren, bei denen der größte Teil der viralen Sequenzen eliminiert und durch ein erwünschtes Fremdgen ersetzt wurde. Virale Vektoren, die ein Transgen enthalten, können von eigens dafür produzierten „Verpackungszellen“ in infektiöse Viruspartikel verpackt werden, diese können dann den frühen Embryo infizieren und sich ins Genom integrieren. Da ihnen aber alle wichtigen viralen Gene fehlen, sind sie anschließend replikationsinkompetent. Heute werden an Stelle von MMLV meist Lenti-virale Vektoren eingesetzt. Diese können sowohl in das replizierende als auch in das nicht-replizierende Genom integrieren, was die Transduktion effizienter macht. Der Pro-

zentsatz an transgenen Tieren – z. B. Schweinen – kann bis zu 70% aller lebend geborenen Nachkommen sein (HOFMANN et al. 2003, WHITELAW et al. 2004). Diese Methode ist technisch einfacher und viel effizienter als die DNA-Mikroinjektion, die beim Schwein meist nur eine Transgenitätsrate von 1% erreicht. Die hohe Effizienz setzt jedoch hohe Titer an infektiösen Viruspartikeln voraus (10^9 bis 10^{10} Partikel pro ml), die nur erreicht werden, wenn die DNA-Sequenz der Transgene recht kurz ist. Dies und die Tatsache, dass, wenn auch nur für einen Arbeitsschritt, mit infektiösen Viren gearbeitet werden muss, sind die Hauptnachteile der viralen Vektoren.

Eine Alternative zum Arbeiten mit infektiösen viralen Vektoren, bei der dennoch eine hohe Transgeneffizienz (bis zu 30%) erreicht wird, ist die Verwendung von Transposonvektoren zusammen mit einem Expressionsvektor für die Transposase oder Transposase-mRNA (CLARK et al. 2007). Wie bei den viralen Vektoren ist die Transgengröße hier ebenfalls limitiert.

DNA-Transfer mit Hilfe von Spermien: LAVITRANO et al. berichteten 1989 erstmals, dass man Spermien mit Fremd-DNA beladen kann, die dann bei der künstlichen oder bei der *In-vitro*-Befruchtung in die Eizelle transferiert wird. Die Veröffentlichung rief großes Interesse hervor, weil mit einer relativ einfachen Methode die Möglichkeit besteht, auch transgene Großtiere mit Hilfe der künstlichen Besamung viel leichter und einfacher zu erzeugen (LAVITRANO et al. 2006). Leider war sie in den meisten Labors nicht erfolgreich, beziehungsweise waren die Transgene nicht intakt. Eine Abwandlung dieser Strategie ist ICSI, die intrazytoplasmatische Spermieninjektion, wobei man die Spermienzellwand erst für die DNA-Aufnahme durchlässig macht. Das hat zur Folge, dass die Spermien an Motilität verlieren und diese deswegen in das Zytoplasma der Eizelle injiziert werden müssen. Dies ist arbeitsaufwendiger als die künstliche Befruchtung, jedoch wurden auf diese Weise transgene Mäuse, Ratten und Schweine erzeugt (MOISYADI et al. 2009).

Nachteile der direkten Transgenese: Allen bisher erwähnten Gentransfermethoden ist gemeinsam, dass die transferierte DNA an einem oder mehreren Orten zufällig in das Genom integriert, was wichtige Konsequenzen nach sich zieht. Zufällig an verschiedenen Loci integrierte Transgene können ein höchst unterschiedliches Expressionsverhalten zeigen, was durch die unterschiedliche Chromatinstruktur (offenes oder geschlossenes Chromatin) in der unmittelbaren Nachbarschaft verursacht wird (CLARK et al. 1994). Dieser „Positionseffekt“ bedeutet, dass mehrere unabhängige transgene Linien erstellt werden müssen, um eine mit dem erwünschten Expressionsmuster zu erhalten, dies betrifft insbesondere Tiere, die mittels DNA-Mikroinjektion erzeugt wurden. Hat ein Tier multiple Transgene an einem Locus (*transgene array*), können sie als repetitive Sequenzen erkannt und durch epigenetische Modifikationen kann die Transkription verhindert werden (*transgene silencing*). Hat ein Tier Transgene, die an multiplen Loci integriert haben, können diese in der nächsten Generation segregieren. Letzteres ist bei viralen und Transposonvektoren häufig der Fall. Eine Integration des Transgens an einem zufälligen Locus kann auch zur Insertionsmutagenese führen, was negative Folgen für das Tier haben könnte. Dies wird jedoch nur selten und meist auch nur in Nachkommen, die homozygot für die Transgenintegration sind, beobachtet. Um unnötige und zeitaufwendige Tierexperimente zu vermeiden, waren Methoden, die es ermöglichten, Transgenintegration und/oder Transkription vorab zu analysieren, erforderlich. Dies wurde durch Zell-vermittelte-Transgenese erreicht.

3.2 Zell-vermittelte-Transgenese

Es besteht die Möglichkeit, dass man Zellen *in vitro* genetisch verändert, um ihren Genotyp später in ein ganzes Tier zu konvertieren. Die kultivierte transgene Zelle dient als eine Art Zwischenlösung des Endproduktes, an der relativ schnell und kostengünstig das Vorhandensein des Transgens, der Integrationsort (Locus), die Struktur und die Expressionsleistung getestet werden können, bevor überhaupt ein lebendes transgenes Tier entsteht. Die Analyse der Zellkulturen ist methodisch ausgereift, und falls erforderlich können Hunderte von unabhängigen Zellklonen analysiert werden. Dies reduziert die Ungewissheiten der direkten Transgenese erheblich, ebenso erlaubt es, eher seltene gezielte genetische Veränderungen in Zellklonen zu entdecken, wie z. B. die Integration eines Transgens durch homologe Rekombination im Wirtsgenom (*gene targeting*).

Gene targeting ermöglicht nicht nur den Einbau eines Transgens an einem ausgewählten Locus im Wirtsgenom (*transgene placement*), sondern auch die Inaktivierung von Genen, oder den Austausch von regulatorischen Sequenzen, von Genen oder einzelnen Basen. Bis vor fünfzehn Jahren waren die pluripotenten embryonalen Stammzellen (ES) der Maus die einzige Möglichkeit, genetisch veränderte Zellen in ein ganzes Tier zu konvertieren. Das hat sich durch die Entwicklung der Kerntransfertechnik jedoch geändert.

Pluripotente Stammzellen: Diese können aus dem frühen Embryo gewonnen werden (embryonale Stammzellen, ES-Zellen), oder man kann eine beliebige Körperzelle (somatische Zelle, z. B. eine Hautzelle) durch das Einbringen von Genen, die für die Pluripotenz wichtig sind (Sox-2, Oct-4, c-Myc und Klf4), wieder dedifferenzieren. Diese Zellen werden als induzierte pluripotente Stammzellen (iPS-Zellen) bezeichnet (TAKAHASHI und YAMANAKA 2006), und sie sind funktional den ES-Zellen sehr ähnlich. Unter adäquaten Kulturbedingungen können sich ES- und iPS-Zellen als undifferenzierte Zellen permanent teilen oder in eine Vielzahl von Zelltypen differenzieren. Letztere Eigenschaft ist für die regenerative Medizin von Interesse. Bringt man ES/iPS-Zellen in einen frühen Embryo zurück, nehmen sie an der normalen Entwicklung des Embryos teil, einschließlich der Keimbahnzellen. Wurden die ES- oder iPS-Zellen zuvor genetisch manipuliert, dann erhält man entsprechend transgene Tiere. Ihre potenteste Anwendung ist jedoch das sogenannte *gene targeting*, d. h. die Fähigkeit der Zellen, mittels homologer Rekombination zwischen einem exogenen DNA-Molekül (*Targeting*-Vektor) und dem chromosomalen Ziellocus DNA auszutauschen. Wie bereits erwähnt, kann man Gene damit inaktivieren (*gene knockout*), Gene ersetzen oder auf die Base genau gezielt verändern. Selbst substantielle Modifikationen sind möglich, wie etwa die Deletion von Megabasen-großen DNA-Fragmenten. In Kombination mit weiteren gentechnischen Methoden kann man Mutationen ins Genom einbringen, die nur zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem bestimmten Zelltyp oder Organ im Tier aktiviert werden (CAPECCHI 2005).

Die ES-Zell-Technologie und das *gene targeting* konnten erstmals bei der Maus etabliert werden. Dadurch wurde die Maus zum meist genutzten Säugetiermodell, um Genfunktionen zu studieren oder Tiermodelle für Humanerkrankungen zu generieren, und die Entwickler der Technologie wurden 2007 mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet. Trotz großer Bemühungen ist es bis heute noch nicht gelungen, funktionale ES-Zellen von Nutztieren zu isolieren und zu kultivieren. Selbst bei der Ratte ist es erst 2008 gelungen (LI et al. 2008, BUEHR et al. 2008). Mit der Gewinnung von Maus-iPS-Zellen hat man nun eine alternative Methode, pluripotente Zellen zu erhalten. Erste vielversprechende Ergebnisse hierzu gibt es auch beim Rind und beim Schwein (HUANG et al. 2011, WEST et al. 2011).

Kerntransfer: In Abwesenheit von ES- oder iPS-Zellen wurde nach einer alternativen Technologie gesucht, die *gene targeting* auch beim Nutztier ermöglicht. Dies wurde verwirklicht mit der Geburt des Klon-Schafs Dolly (WILMUT et al. 1997), genauer gesagt durch den Kerntransfer mit somatischen Zellen. Das Standardverfahren verläuft so, dass zunächst das Genom der unbefruchteten Eizelle entfernt und dann durch einen Spenderkern ersetzt wird. Der so „rekonstruierte“ Embryo wird dann in ein Empfängertier transferiert, um eine Trächtigkeit zu etablieren. Im Gegensatz zur ES-Zell-Technologie ist der somatische Kerntransfer bei allen Nutztieren und in über 16 Spezies erfolgreich durchgeführt worden.

Somatische Zellen weisen, verglichen mit ES- oder iPS-Zellen, nur eine begrenzte Lebensdauer in Kultur auf, dennoch kann man sie nutzen, um Transgene einzubringen (SCHNIEKE et al. 1997) oder *gene targeting* durchzuführen (MCCREATH et al. 2000). *Gene targeting* mit somatischen Zellen ist allerdings schwieriger und weniger effizient als mit Maus-ES-Zellen.

Perinatale Abnormalitäten und Sterblichkeit sind nach wie vor ein ernstes Problem des Kerntransfers. Dies ist unabhängig von der genetischen Veränderung der kultivierten Zellen, sondern wird generell auf unvollständige epigenetische Reprogrammierung zurückgeführt. Bisher gibt es keine Marker, die vorhersagen können, bei welchen Zellisolaten oder Zellklonen epigenetische Veränderungen auftauchen. Diese Effekte sind glücklicherweise auf die Gründergeneration beschränkt. Ihre Nachkommen zeigen keine erhöhte Krankheitsanfälligkeit oder Sterblichkeit, selbst Nachkommen, deren beide Eltern durch Kerntransfer erzeugt worden waren.

Trotz der erwähnten Probleme wurden in den letzten Jahre fast alle transgenen Schweine, Rinder, Ziegen sowie alle Nutztiere mit gezielter genetischer Veränderung mittels Kerntransfer erzeugt. Die Technik verfeinert sich ständig und auch das Wohlergehen der Tiere verbessert sich. Die dafür notwendigen Eizellen werden aus Schlachthofmaterial (Eierstöcken) isoliert und *in vitro* gereift, deshalb sind relativ wenige Versuchstiere für den Kerntransfer erforderlich. Da der transgene Status der Spenderzelle bereits im Vorfeld analysiert wird, ist jedes Tier, das geboren wird, transgen (100%), verglichen mit 1% bis 5% bei der DNA-Mikroinjektion. Hat man ein Tier mit gezielter genetischer Veränderung erzeugt, ist dann auch nur die Geburt eines lebensfähigen Tieres notwendig, um eine transgene Linie zu etablieren.

3.3 Gezielte Genom-Modifizierung in der Eizelle: *gene editing*

Mit der Einführung des *gene editing*, so genannt um es vom *gene targeting* zu differenzieren, wurde jetzt eine technologische Hürde übersprungen, sowohl hinsichtlich der Effizienz, mit der gezielte Veränderungen ins Genom eingebracht werden können, als auch hinsichtlich der Wahl der Spezies. Die Methode beruht auf dem Einsatz neuartiger sequenzspezifischer Nukleasen; Zink-Finger-Nukleasen (ZFNs) als auch *Transcription Activator Like Effector Nucleases* (TALENs), künstliche Restriktionsenzyme, basierend auf TAL-Effektorproteinen (CLARK et al. 2011). Sie sind funktionell in Pflanzen, Reptilien, Fischen und Säugetieren. Durch die hohe Effektivität kann die Genmanipulation in Zellen, aber auch direkt in der befruchteten Eizelle durchgeführt werden, und das selbst in Säugetierarten, für die es weder funktionale ES-Zellen gibt noch der Kerntransfer eine Option darstellt, wie z. B. das Kaninchen (FLISIKOWSKA et al. 2011). ZFNs und TALENs werden häufig auch als molekulare Scheren oder Designer-Nukleasen bezeichnet, da sie die Zielsequenz im Genom erkennen und dort einen DNA-Doppelstrangbruch induzieren. Dies hat zur Folge, dass

ein Reparaturmechanismus in der Zelle aktiviert wird, der oft in kleinen Insertionen oder Deletionen an der Bruchstelle resultiert. Dies kann zur Geninaktivierung führen, ohne im Genom Spuren in Form von Fremd-DNA zu hinterlassen. Wird dagegen ein Vektor mit homologen Sequenzen gemeinsam mit den Designer-Nukleasen transfiziert, so können über homologe Rekombination definierte Mutationen oder Transgene am gewünschten Locus eingeführt werden (Abb. 1). Im Vergleich zum herkömmlichen *gene targeting* allerdings mit deutlich erhöhter Effizienz (5–50%). Aufgrund der hohen Effizienz kann auf Zellkultur und die dafür notwendigen Selektionsmarker verzichtet werden, da das *gene editing* direkt im frühen Embryo durchgeführt werden kann. Es wurden lebensfähige Ratten und Schweine mit einem gezielt inaktivierten Gen erzeugt, indem man mRNAs, welche für die ZFNs bzw. TALENs codierten, direkt in das Zytoplasma einer befruchteten Eizelle (Zygote) injizierte (GEURTS et al. 2009, CARLSON et al. 2012). Zytoplasma-Injektionen sind viel einfacher als Injektionen in den Zellkern, vor allem wenn die Zygote wie beim Schwein nicht transparent ist. Homologe Rekombination in der Zygote wurde für Maus und Kaninchen gezeigt (WEFERS et al. 2013, FLISIKOWSKA et al. 2011). Eine Übersicht über die Möglichkeiten der genetischen Manipulation mittels Designer-Nukleasen ist in Abbildung 1 dargestellt.

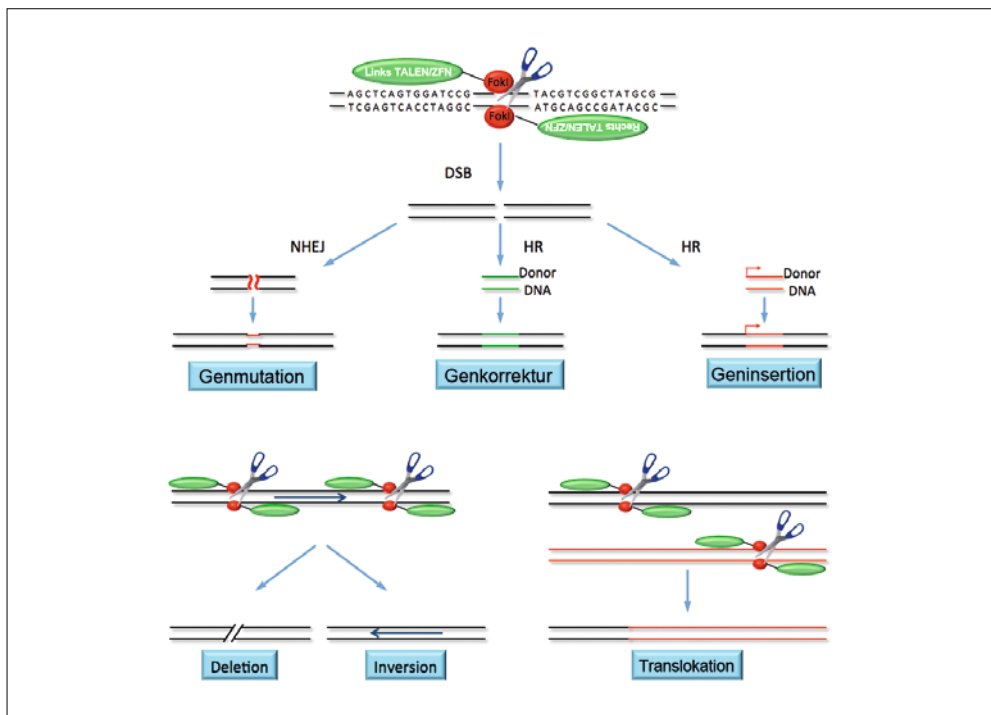


Abb. 1 *Genome editing*. Designer-Nukleasen binden an spezifische DNA-Sequenzen, induzieren einen Doppelstrangbruch (DSB), der durch nicht-homologes *end-joining* (NHEJ) oder durch homologe Rekombination (HR) repariert werden kann. NHEJ führt zu Mutationen durch Insertionen oder Deletionen (*gene disruption*). HR mit Donor-DNA können zur Einführung eines präzisen Nukleotidaustauschs (*Gene correction*) oder Insertion (*Gene addition*) führen. Der Einsatz von 2 Nukleasen, die DSBs auf 2 unterschiedlichen Chromosomen induzieren, kann in einer Translokation resultieren (*Translocation*), während 2 DSBs in cis auf demselben Chromosom zur Deletion oder Inversion der dazwischen liegenden Sequenz führen kann.

Erwähnenswert ist auch, dass häufig nicht nur ein Allel modifiziert wird – wie beim *gene targeting* –, sondern beide Allele gleichzeitig. Man kann also Gründertiere mit einem homozygoten *Knockout* erhalten. Phänotypenanalysen können sofort durchgeführt werden, ohne dass man auf Homozygotie züchten muss, was bei Großtieren sehr zeitaufwendig ist, vor allem da bei Nutztieren Inzucht vermieden werden sollte.

Designer-Nukleasen eröffnen somit neue Möglichkeiten für die genetische Manipulation fast aller Zelltypen und in einer Vielzahl von Spezies. Sie können mit der zellvermittelten Transgenese kombiniert oder direkt im Embryo eingesetzt werden. Man kann sie im Labor in einem Baukasten-ähnlichen Prinzip selbst herstellen, sie sind hoch spezifisch, und darüber hinaus werden neben ZFNs und TALENs noch zusätzlich neue Systeme entwickelt, wie z. B. das *genome editing*, basierend auf der RNA-geführten Cas9-Nuklease (CONG et al. 2013, MALI et al. 2013). Es ist noch eine recht junge Technologie, die nicht nur für die Erzeugung genetisch modifizierter Nutztiere neue Möglichkeiten eröffnet.

4. Anwendungen und Perspektiven der Roten Gentechnik beim Nutztier

Die möglichen Anwendungsbereiche der Gentechnik beim Nutztier sind in Abbildung 2 dargestellt. Einfachheitshalber werden im Text die unterschiedlichen Applikationen in zwei Bereichen zusammengefasst: Agrar und Biomedizin. Unter Agrar fallen tierische Produkte, Umweltbelastung durch Tierhaltung, Futtermittelverwertung sowie Tiergesundheit und -haltung. Dies sind Themen, die beim vorhergesagten globalen Wandel, vor allem in Bezug auf Bevölkerungswachstum und globale Umweltveränderung von Bedeutung sind.

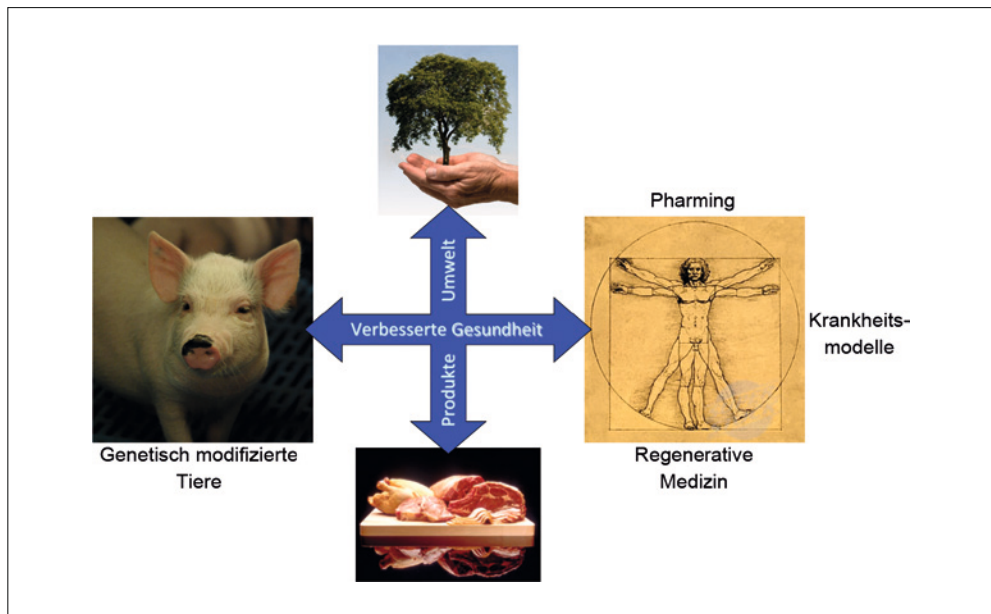


Abb. 2 Anwendungsbereiche der Gentechnik

Die Rolle der Gentechnik steht dabei außer Frage, da sie im Agrarbereich bereits essentielle Funktionen in der Züchtung, im Veterinärbereich und in der Kontrolle tierischer Produkte hat. Eine neue Fragestellung wäre deshalb, welche Vorteile gentechnisch modifizierte Nutztiere haben könnten. Allein die technische Möglichkeit, das Genom von Tieren zu verändern, ist noch kein Grund, dies auch durchzuführen.

Der Hauptanstoß, um *transgene*-, *gene targeting*- und *gene editing*-Techniken für das Großtier zu entwickeln, kam und kommt aus der Biomedizin. Ursprünglich war es die Produktion von rekombinanten pharmazeutischen Proteinen im Tier (Schaf, Ziege, Rind), und kurz danach waren es die regenerative Medizin (Xenotransplantation) und die Tiermodelle (meist Schwein) für humane Erkrankungen. Auch hier spielt die demographische Veränderung, eine immer älter werdende Bevölkerung und ein immer größer werdendes Sicherheitsverlangen eine wichtige Rolle.

4.1 Anwendungen in der Biomedizin

Herstellung von Biopharmazeutika: Biopharmazeutika sind medizinisch wertvolle Proteine, die zu komplex sind, als dass man sie chemisch synthetisieren könnte. Sie müssen entweder aus biologischem Material, wie aus menschlichem Blut, isoliert oder in lebenden Zellen (Zellkultur oder Tieren) produziert werden. Isolierungen von Proteinen aus menschlichem Blut haben zwei Nachteile, zum einen ist die Menge an Protein, das daraus gewonnen werden kann, limitiert, und zum anderen können mit dem isolierten Protein unbekannte Pathogene von Mensch auf Mensch übertragen werden. Es lag daher nahe, die Synthese solcher humanen Proteine in genetisch veränderten, genau kontrollierbaren Organismen durchführen zu lassen. Solche rekombinanten Proteine reduzieren ganz deutlich die Gefahr einer Krankheitsübertragung, sind kostengünstiger und von gleichbleibender Qualität, bzw. ihre Eigenschaften wie Pharmakokinetik können gentechnisch verbessert werden.

Viele einfach gebaute Proteine können in rekombinanten Bakterien oder in Hefezellen synthetisiert werden (z. B. Insulin). Manche Proteine (z. B. Blutgerinnungsfaktoren) müssen jedoch posttranslational von der Zelle noch weiter aufbereitet werden, damit sie ihre spätere Funktion ausüben können. Diese posttranslationalen Modifikationen vermögen nur tierische Zellen auszuführen. Biopharmazeutika zählen heute zu den Blockbuster-Medikamenten (solche, die Einnahmen von mehr als einer Milliarde US-Dollar erzielen), neun der Top-10-Produkte werden in Säugetierzellen hergestellt (HUGGET et al. 2010). Sie zählen zum am schnellsten wachsenden Sektor in der Medikamentenentwicklung.

Die Idee, Biopharmazeutika in transgenen Tieren herzustellen (*Pharming*), tauchte erstmals 1985 im Rahmen eines Seminars in Edinburgh auf. Rick LATHE, John CLARK, John BISHOP und ihre Mitarbeiter schlugen vor, pharmazeutische Proteine in der Milch von transgenen Tieren synthetisieren zu lassen. Daraufhin wurden wenig später mehrere Biotechnologie-Firmen gegründet. Die Herstellung der Proteine in der Milch transgener Tiere wurde als Alternative zur Produktion in Zellkultur angesehen, mit dem Vorteil niedrigerer Kosten und größerer Produktionskapazität (KIND und SCHNIEKE 2008). Bis heute haben allerdings lediglich zwei Produkte aus transgenen Tieren die offizielle Zulassung erhalten. Es ist das menschliche Antithrombin III (*ATryn*) (LAVINE 2009), das die Biotechnik-Firma GTC aus Ziegenmilch herstellt. Das zweite Produkt ist der C1-Inhibitor, der in Kaninchen erzeugt wird (VAN VEEN et al. 2012).

Andere Biopharmazeutika, die im Nutztier produziert werden, sind noch im Entwicklungsstadium bzw. in den frühen klinischen Phasen. Ein interessantes Beispiel sind die Antikörper für die Humantherapie. Diese finden bei der Krebstherapie, bei Autoimmunerkrankungen, Organtransplantationen, bei Infektionen mit Antibiotikaresistenz, bei der Abwehr von Biowaffen und bei Immundefizienzerkrankungen Einsatz. Gerade bei der Tumorbehandlung werden große Mengen an Antikörpern benötigt, sodass eine kostengünstige Produktion im Großtier vorteilhaft sein könnte. Dass die Produktion im Tier möglich ist, wurde bereits gezeigt (GROSSE-HOVEST et al. 2004). Dennoch sind nach wie vor alle am Markt befindlichen therapeutischen, monoklonalen Antikörper in tierischen Zellkulturen erzeugt worden. Eine andere Situation liegt bei den humanen polyklonalen Antikörpern vor. Diese können die natürliche Abwehrreaktion viel besser nachahmen, weil sie mehr Epitope erkennen und die Aktivierung des Komplements sowie der Neutrophilen und Makrophagen umfangreich auslösen. Humane polyklonale Antikörper konnten aber nur aus menschlichem Blut gewonnen werden, was vor allem die Menge und die Spezifität, letztendlich also die Verfügbarkeit polyklonaler Antikörper stark beschränkte. Mittlerweile kann man jedoch humane polyklonale Antikörper in transgenen Mäusen generieren (JAKOBOVITS et al. 2007). Da eine erwachsene Maus nur insgesamt etwa 10 mg Immunglobuline im Blut hat, sind sie für die Produktion von großen Mengen an Antiseren nicht geeignet. Wenn man jedoch das Immunsystem von Nutztieren „humanisieren“ würde, wie das bei Rind und Kaninchen angestrebt wird (KUROIWA et al. 2009, FLISIKOWSKA et al. 2011), könnten ausreichende Mengen an Immuneserum gewonnen werden.

Der ursprüngliche Enthusiasmus im Bereich *Pharming* ist mittlerweile gedämpft. In der Anfangsphase gab es bei der Produktion in der Zellkultur häufig Engpässe, die durch neue Produktionsanlagen überwunden wurden. Durch die Produktion in Zellen treten im Vergleich zur Produktion mit Tieren keine ethischen Probleme auf, was für das Image der Pharmaindustrie von Bedeutung ist. Kostenersparnisse könnten in der Zukunft eine Rolle spielen, sind aber zurzeit kein limitierender Faktor. Verglichen mit der Produktion im Tier ist – wo möglich – die Produktion in Pflanzen, Bakterien oder Hefen kostengünstiger. Sowohl Bakterien als auch Hefen werden genetisch modifiziert, sodass sie zumindest einen Teil der humanen posttranslationalen Modifikationen durchführen können (KAMIONKA 2011). Allein bei der Herstellung von polyklonalen Antikörpern wird es für die Produktion im Nutztier vorläufig keine realistische Alternative geben.

Regenerative Medizin: Die Verwendung von multipotenten und pluripotenten Stammzellen – einschließlich Patienten-spezifischer iPS-Zellen – zur Behandlung von Krankheiten oder auch die Regeneration von Geweben, die durch Krankheit oder Unfall geschädigt sind, verspricht aufregende Fortschritte. Es müssen allerdings Sicherheitsaspekte, Funktionalität und Effektivität dieser Methoden evaluiert werden, was notwendigerweise im gesamten Organismus, im Tier, geschehen muss. Neben Versuchen im Kleintier werden hier auch physiologisch relevante Großtierversuche verlangt (*Guidelines for Clinical Translation of Stem Cells*; www.isscr.org/clinical_trans/). Hierzu sind zum einen genetisch definierte Tiermodelle für menschliche Krankheiten und degenerative Syndrome erforderlich. Ein Beispiel sind porcine Modelle für neurodegenerative Erkrankungen wie „Alzheimer’s Disease“ (KRAGH et al. 2009). Zum anderen sind auch Großtiermodelle für die Xenotransplantation von humanen Zellen oder Geweben ins Tier notwendig, z. B. durch gezielte Inaktivierung von Genen, um immundefiziente Schweine zu erzeugen, was kürzlich von einer japanischen Gruppe publiziert wurde (SUZUKI et al. 2012).

Ein anderer Ansatz in der regenerativen Medizin ist die Xenotransplantation von Schweinezellen, -geweben oder -organen in den Menschen. Die immunologischen Barrieren, die sich bei der Transplantation solcher artfremden Organe aufürmen, sind jedoch hoch. Transgene Tiere mit multiplen genetischen Veränderungen müssen zunächst generiert werden, bevor Schweine als passende Organspender für den Menschen infrage kommen. Erst mit der Entwicklung der Kerntransfertechnik und des *gene targeting* konnte die Xenotransplantation von Organen als eine realisierbare Möglichkeit angesehen werden.

Xenotransplantation: In Deutschland und in anderen Ländern der Welt besteht ein Mangel an Organspendern, und für viele Patienten kommen passende Organe zu spät. Durch die steigende Zahl an Diabetikern gibt es einen zunehmenden Engpass in der Verfügbarkeit von Inselzellen und Nieren, die für eine Transplantation geeignet sind. Xenotransplantation von Geweben und Organen von genetisch veränderten Schweinen könnten diese Knappheit beheben. Transplantiert man jedoch ein Organ des Schweins unverändert in einen Menschen oder einen anderen Primaten, wird eine Kaskade von akuten Abstoßungsreaktionen hervorgerufen. Als Erstes tritt die hyperakute Abstoßung (*HAR*) ein, die das transplantierte Organ innerhalb von Minuten, spätestens Stunden zerstört. Danach folgt die akute humorale (im Blut) Transplantatabstoßung (*AHXR*, *acute humoral xenograft rejection*), auch als akute vaskuläre Abstoßung bekannt, die sich über Tage bis Wochen erstreckt (YANG und SYKES 2007, SHIMIZU und YAMADA 2010).

Bei der hyperakuten Reaktion aktiviert der Antigen-Antikörper-Komplex das Komplementsystem des Wirts, welches Zerstörung und Lyse der Zellen auslöst sowie die Kaskade der Blutgerinnung. Das Ergebnis sind schwere Blutungen, Ödeme und Thrombosen in den kleinen Blutgefäßen, die zum schnellen Absterben des Transplantats führen. Das für die *HAR* hauptverantwortliche Antigen ist das zuckerähnliche Epitop $\alpha 1,3$ -Galaktose ($\alpha 1,3$ -GT), das auf der Oberfläche fast aller Säugetierzellen (einschließlich der Schweinezellen), nicht aber beim Menschen, vorhanden ist. Die beste Strategie war deswegen die genetische Inaktivierung des Schlüsselenzyms $\alpha 1,3$ -GT, das für die Synthese der Galaktose im Wirtstier verantwortlich ist (DAI et al. 2002), sowie die Überexpression von menschlichen Komplementinhibitoren. Organe (Herz, Niere) von diesen transgenen Schweinen waren mehrere Monate im Affen funktional, ohne Anzeichen von *HAR* (TSENG et al. 2005, YAMADA et al. 2005).

AHXR stellt das nächste größere Hindernis bei der Xenotransplantation dar. Nicht alle Mechanismen, die hier eine Rolle spielen, sind bekannt. Beteiligt sind Veränderungen im Schweine-Endothel (innere Zellen der Blutgefäße), eine Inkompatibilität zwischen dem Blutgerinnungssystemen von Schwein und Mensch sowie Nicht- $\alpha 1,3$ -Galaktose-Epitope, was letztendlich zu Blutungen der Kapillare und zum Zelltod führt (COWAN 2007). Transgene, die die Regulation der Blutgerinnung wiederherstellen, und solche, die das Endothel schützen, sind deshalb Gegenstand der aktuellen Forschung (KLYMIUK et al. 2010). Weitere Herausforderungen liegen in der Ausschaltung der zellständigen Immunabwehr, und es müssen Wege gefunden werden, mögliche Infektionen von Tier auf Mensch abzuwehren. Für beides werden ebenfalls transgene Ansätze verfolgt.

Ist Xenotransplantation realisierbar? Es ist unumstritten das Gebiet mit der größten Herausforderung an die Gentechnik. Und dennoch, Xenotransplantation wird in die Klinik kommen. Transplantation ganzer Organe wird eine Herausforderung bleiben und vielleicht nie als Lösung, sondern eher als Zwischenlösung fungieren, bis ein humanes Organ verfügbar ist. Aber die Transplantation von Zellen oder Zellverbänden, wie z. B. Insulin-

produzierenden Inselzellen, wird bereits klinisch getestet (ELLIOTT et al. 2007). Da diese durch Einkapselung vor dem Angriff durch Immunzellen geschützt werden, können selbst nicht transgene Donor-Inselzellen im Empfänger überleben, was durch schützende Transgene noch verbessert werden kann.

Krankheitsmodelle: Es sollte die größtmögliche Anstrengung unternommen werden, die Anzahl der Versuchstiere in der biomedizinischen Forschung, immer wenn möglich, zu reduzieren. Ein sicherer und effektiver Transfer von Medikamenten und medizinischen Verfahren aus dem Labor in die Klinik erfordert präklinische Studien, in denen der ganze Organismus unter physiologischen und anatomischen Gesichtspunkten mit einbezogen werden muss. Insofern sind Tierversuche im Moment noch unvermeidbar, jedoch sollten die Tiermodelle dann aussagekräftig sein.

Dadurch, dass ES-Zellen und *gene targeting* lange Zeit nur bei der Maus verfügbar waren, sind mehr oder weniger alle genetisch definierten Tiermodelle für menschliche Krankheiten Mausmodelle. Diese haben dazu beigetragen, dass wir die molekularen Grundlagen vieler Krankheiten besser verstehen. Allerdings beschränken viele entscheidende Faktoren die Aussagekraft des Mausmodells: Körpergröße, Physiologie, Anatomie, Ernährung und Lebensdauer. Beispielsweise kann man Bestrahlung oder Wärmebehandlung zur Therapie von Tumoren nicht einfach im kleineren Maßstab anwenden. Ähnlich ist eine endoskopische Untersuchung bei der Maus wegen ihrer geringen Körpergröße nur äußerst schwer durchführbar. Trotz grundlegender, gemeinsamer biochemischer Abläufe kommt es in der Maus häufig auch zu deutlich anderen Krankheitsbildern als beim Menschen. Während beim Menschen Mutationen im Adenomatösen-Polyposis-Coli (APC)-Gen zu bösartigen Tumoren in Dickdarm und Rektum führen können, verursachen die gleichen Mutationen bei der Maus eine wenig invasive und kaum metastasierende Neoplasie im Dünndarm (FLISIKOWSKA et al. 2012). Ähnlich zeigen Mäuse mit einem Defekt des CFTR-Gens (*Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator*) nicht den gleichen Phänotyp wie Menschen, die unter zystischer Fibrose leiden (ROGERS et al. 2008). Bei degenerativen neuronalen Erkrankungen, wie Parkinson- und Alzheimer-Krankheit, gibt es Defizite beim neuronalen Phänotyp (KRAGH et al. 2009), und auch bei inflammatorischen Erkrankungen wird die Validität von Mausmodellen angezweifelt (SEOK et al. 2013). Aus diesen Gründen ist es notwendig, Tiermodelle in anderen Tierarten zu entwickeln und zu evaluieren.

Schweine werden seit langem in der biomedizinischen Forschung verwendet, um neue Methoden der experimentellen Chirurgie zu entwickeln, für Organtransplantationen, Techniken der Bildgebung und auch als Modelle für manche Krankheiten des Menschen. Bis vor kurzem jedoch konnte man solche Großtiermodelle für menschliche Krankheiten nur durch chemische oder chirurgische Eingriffe herstellen, oder man musste sich auf spontane Krankheitsanfälligkeiten beschränken, die wiederum genetisch nicht definiert sind. Die ersten transgenen Schweinemodelle beruhten auf der Expression von krankheitsassoziierten Genen mit dominant negativen Mutationen: porcines Alzheimer-Modell (KRAGH et al. 2009), Modell für Typ-2-Diabetes (RENNER et al. 2010) (siehe auch Tab. 3). Das erste Modell mit gezielter Modifikation eines endogenen Gens waren die CFTR-defizienten (*Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator*) Schweine von ROGERS et al. (2008), ein Modell für die zystische Fibrose (Mukoviszidose) beim Menschen.

Tab. 3 Nutztiermodelle für humane Erkrankungen

Erkrankung	Referenz
Alzheimer-Krankheit	KRAGH et al. 2009
Atherosklerose	AL-MASHHADI et al. 2013
Brustkrebs	LUO et al. 2011
Darmkrebs	FLISIKOWSKA et al. 2012
Li Fraumeni multiples Tumorsyndrom	LEUCHS et al. 2012
Hämophilie A	KASHIWAKURA et al. 2012
Huntington-Krankheit	YANG et al. 2010
Immundefizienz	MENDICINO et al. 2011, SUZUKI et al. 2012
Kardiovaskuläre Erkrankung	HAO et al. 2006
Polyzystische Nieren (PKD2)	HE et al. 2013
Retinitis Pigmentosa	KRAFT et al. 2005, PETERS et al. 1997
Stargardt-artige Makula-Dystrophie Typ 3	SOMMER et al. 2011
Typ-1-Diabetes-mellitus	RENNER et al. 2012
Typ-2-Diabetes-mellitus	RENNER et al. 2010
Typ-3-MODY-Diabetes	UMEYAMA et al. 2009
Vaskuläre Tonusregulation	WHYTE et al. 2011
Zystische Fibrose	ROGERS et al. 2008, KLYMIUK et al. 2012

Immer mehr Schweinemodelle werden entwickelt (siehe Tab. 3), und es stellt sich die Frage: Sind sie aussagekräftiger als Mausmodelle und replizieren sie den humanen Phänotyp besser als die Maus? Bisherige Ergebnisse scheinen dies zu stützen. Die CFTR-defizienten Ferkel zeigen – wie der menschliche Patient – Abnormalitäten der Bauchspeicheldrüse, der Leber und des Darms (ROGERS et al. 2008). Bei der Maus sind diese abwesend. Beim Schweinemodell für das kolorektale Karzinom entwickeln sich die Polypen – wie beim Menschen – im Dickdarm, bei der Maus im Dünndarm (FLISIKOWSKA et al. 2012).

4.2 Anwendungsmöglichkeiten in der Landwirtschaft

Im Gegensatz zu den Pflanzen gibt es keine genetisch modifizierten Nutztiere, die für die Futter- oder Lebensmittelproduktion zugelassen sind. Auf den Markt wird in naher Zukunft möglicherweise der **AquAdvantage**[®]Lachs der Firma Aquabounty (<http://www.aquabounty.com>) kommen, der das Wachstumshormon-Gen von einer anderen Lachsart (Chinook) trägt. Seit Jahren befasst sich die FDA (*Food and Drug Administration*) mit der Zulassung des Lachses, eine Entscheidung wird für dieses Jahr erwartet. „GM-Lebensmittel“ stoßen bei den Verbrauchern – vor allem in Europa – auf wenig Akzeptanz. Angesichts globaler Herausforderungen, limitierter Ressourcen und einer wachsenden Bevölkerung sollte man gentechnische Möglichkeiten beim Nutztier jedoch nicht außer Acht lassen. Allein beim Transfer eines bestimmten Merkmals von einer Rasse auf die andere könnte man die Gentechnik vorteilhaft nutzen. Um dies an einem Beispiel darzustellen: Bei der Haltung von behornten Kühen im Laufstall be-

steht Verletzungsgefahr für Tier und Mensch, pro Tier wird entweder mehr Platz benötigt, man enthornt die Kälber oder züchtet hornlose Rinder. Züchtung kann jedoch zeitaufwendig sein, und andere gewünschte Merkmale können segregieren. Die dominante Mutation, die Hornlosigkeit verursacht, ist bekannt (MEDUGORAC et al. 2012). Gentechnisch (z. B. mit Hilfe von TALENs) könnte man genau diese Mutation in ein kloniertes Tier einbringen. Wenn man anschließend die Genomsequenz des klonierten Tieres und des Donortieres vergleichen würde, wäre diese – bis auf die gewünschte Merkmalveränderung – identisch. Anhand der Genomsequenz alleine könnte man keine Aussage machen, ob dies ein GM-Tier ist, oder ob Hornlosigkeit durch Züchtung eingebracht wurde, da außer der Mutation keine zusätzliche Fremd-DNA vorhanden ist. Es wäre interessant zu sehen, wo dies regulatorisch gehandhabt wird, Milch von Tieren mit identischer Mutation, einmal natürlich mutiert und einmal gentechnisch induziert. Dies Beispiel zeigt auch die Einschränkungen der Gentechnik: Um gezielt ins Genom einzugreifen, benötigen wir Genominformationen, Information über Allel-Varianten, über deren phänotypische Auswirkung, oder über die molekulare Basis von Infektionskrankheiten und Interventionsmöglichkeiten. Im Idealfall ist die Auswirkung des Merkmals nur von einem Gen abhängig und nicht von multiplen Genen, was bei Produktionsmerkmalen häufig der Fall ist. Positiv ist, dass das Genom von Rind und Schwein und anderen Tierspezies bereits sequenziert wurde und dass Sequenzanalysen immer preisgünstiger werden, so dass vergleichende Genom- und Transkriptom-Analysen unterschiedlicher Tiere einer Rasse, verschiedener Rassen und seltener Rassen bald erhältlich sind. Auch die Genomsequenzierung der gentechnisch veränderten Tiere könnte routinemäßig als Nachweis durchgeführt werden, dass keine ungewollten Änderungen stattfanden. Trotz Skepsis bei den Verbrauchern gibt es Ansätze, Probleme bei der Tiergesundheit, der Umweltbelastung und den Produktionseigenschaften mittels Gentechnologie zu lösen, einige davon sind im Folgenden aufgeführt.

Tiergesundheit und Reproduktion: Verbesserungen im Sektor Tiergesundheit würden dem Tier zugutekommen, reduzieren das Zoonose-Risiko, und auch beim Verbraucher könnte man hier eventuell auf Akzeptanz stoßen. Es gibt bereits klare Vorschriften, die den Einsatz von Antibiotika in der Landwirtschaft regeln, dennoch wurden laut Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) 1734 t Antibiotika im Jahr 2011 eingesetzt. Genetische Veränderungen bieten hier die Möglichkeit, Resistenzen gegenüber Pathogenen zu erzeugen, was mit anderen Mitteln nur schwer zu erreichen wäre. Es wurden bereits transgene Rinder erzeugt mit vererblicher Resistenz gegen bakterielle Mastitis, verursacht durch *Staphylococcus aureus* (WALL et al. 2005). Transgene Ziegen geben Milch, die das humane Lysozym-Gen enthält, das nachweislich das Wachstum der Mastitiserreger *Escherichia coli* und *Staphylococcus aureus* hemmt (MAGA et al. 2006). In anderen Bereichen wurden Rinder erzeugt, die resistent gegen BSE (Bovine spongiforme Enzephalopathie) sind (RICHT et al. 2007). Forschergruppen prüfen, inwieweit genetische Modifikation zur Resistenz gegen Brucellose, gegen PRRSV (*Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Virus*), Maul- und Klauenseuche oder afrikanisches Schweinefieber beitragen kann. Auch bei der Vogelgrippe gibt es bereits Bestrebungen, gegen das Virus resistente Hühner zu generieren (LYALL et al. 2011).

Bevor jedoch genetische Strategien für Krankheitsresistenzen entwickelt werden können, sind genaue molekulare Kenntnisse über den Erreger und seine Interaktion mit dem Wirtsorganismus notwendig. Welche Wirtsgene sind involviert? Was ist de-

ren Funktion im gesunden Organismus? Inwieweit könnte man hier manipulieren, ohne dass die normale Funktion beeinträchtigt wird? Hier besteht noch Bedarf für Grundlagenforschung. Andererseits kann bei der Suche nach möglichen Zielgenen die genetische Variabilität und Diversität Hilfestellung leisten. Es ist bekannt, dass der Anfälligkeit für Mastitis bei Rindern ein starker genetischer Faktor zugrunde liegt (PANT et al. 2007). Ein anderes Beispiel ist die Schlafkrankheit, die durch den Parasiten *Trypanosoma* sp. hervorgerufen wird, in afrikanischen Länder verbreitet ist und gegen die Vakzine nur bedingt tauglich sind. Manche Rinderrassen sind jedoch weitgehend resistent gegen Trypanosomen. Sind die genetischen Determinanten für die Trypanotoleranz bekannt (NOYES et al. 2011), könnten diese gentechnisch in andere Rinderrassen transferriert werden, ohne dass – wie bei der Zucht – auch andere Produktionsmerkmale beeinflusst werden.

Die Fortpflanzungsleistung ist ein sehr bedeutender Faktor in der tierischen Produktion. Es ist bekannt, dass bestimmte Rassen überdurchschnittlich fruchtbar sind, wie z. B. das Booroola-Merinoschaf oder das chinesische Meishanschwein. Die Verbindung des Merkmals Fruchtbarkeit mit anderen wünschenswerten Merkmalen, etwa einer hohen Wachstumsrate, ist mit konventioneller Zucht komplex, schwierig und zeitraubend. Wo ein einzelnes Gen für ein Merkmal verantwortlich ist, wie das BMP1b im Booroola-Schaf (MULSANT et al. 2001), könnte man ein solches Gen durch *gene targeting/editing* nahtlos in denselben Locus bei den Tieren einfügen, die schon über andere vorteilhafte Merkmale verfügen. Die Überlebensrate und das Wachstum der Nachkommen kann durch Veränderung der Milchinhaltsstoffe verbessert werden. So sind transgene Schweine erzeugt worden, die das bovine α -Lactalbumin in die Milch exprimieren, wodurch mehr Ferkel überleben und sich besser entwickelten (WHEELER et al. 2001). Ähnlich könnte die Überexpression anderer Faktoren, so etwa Lactoferrin, antimikrobiell wirkende Peptide oder Lysozym, von Vorteil sein.

Umwelt: Intensive Landwirtschaft und die Notwendigkeit, eine ständig wachsende Weltbevölkerung zu ernähren, stellen enorme Belastungen der Umwelt dar. Das wahrscheinlich anschaulichste Beispiel der Biotechnologie, wie Umweltbelastungen durch landwirtschaftlich genutzte Tiere vermindert werden können, ist das *Enviro-pig*TM. Die transgenen Schweine exprimieren das bakterielle Phytasegen in der Speicheldrüse, wodurch die Verwertung des Phosphors aus dem Futter gesteigert und der Phosphorgehalt im Kot deutlich (70%) reduziert wird (GOLOVAN et al. 2001). Phosphor aus Tierdung trägt stark zur Eutrophierung von Flüssen und Seen bei. Wenn man bedenkt, dass der globale Schweinebestand bei ca. 0,75 Milliarden Schweine liegt, in Deutschland bei ca. 27,4 Millionen (Quelle: *European Commission; US Department of Agriculture*), besteht hier klarer Handlungsbedarf. Ähnliches gilt auch für die Hühnerhaltung. Futtermittelenzyme wie Phytase werden bei Geflügel und Schweinen bereits zur besseren Verwertung von Phosphat eingesetzt, die Verfügbarkeit von Mineralien und Spurenelementen wird ebenfalls verbessert. Diese Phytase wird aus gentechnisch modifizierten Pilzkulturen gewonnen (HAEFNER et al. 2005). Auch bestimmte Pflanzen produzieren Phytase, jedoch ist die Menge bei gängigen Futtermitteln wie Mais nicht ausreichend. Deswegen gibt es erste Ansätze, transgenen Mais mit erhöhter Phytaseproduktion zu erzeugen (CHEN et al. 2008). Um die Umweltbelastung zu mindern, um die Futtermittelverwertung zu verbessern, gibt es also alternative Ansätze, aber selbst die, die bereits praktiziert werden, beruhen auf der Gentechnik.

Bei der Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre trägt besonders das Methan von Wiederkäuern zur Klimaänderung bei. Seinen Anteil zu reduzieren, würde nicht nur die Umwelt schonen, sondern auch den Futterenergieverlust reduzieren. Auch hier könnte die Transgentechnologie eine Möglichkeit eröffnen, die Pansenflora und damit den Futterverdau zu modifizieren, z. B. durch Inokulation mit genetisch modifizierten *E. coli* mit höherer Nitritreduktase-Aktivität (SAR et al. 2005). Auf diesem Gebiet ist noch beträchtliche Grundlagenforschung nötig.

Neben der Umweltbelastung durch die Tiere stellen die Veränderungen der Umwelt, wie globale Erwärmung oder Konkurrenz um Ressourcen, die Tierhaltung vor weitere Herausforderungen. Hitzestress hat bei Rindern negative Auswirkungen auf Milchproduktion und Reproduktion. Identifizierung von Thermotoleranzgenen in adaptierten Rinderrassen (HANSEN 2004) und deren Transfer entweder durch Züchtung oder gentechnisch könnten hier vorteilhaft sein. Auch im Bereich Futterverwertung hat es bislang wenige genetische Verbesserungen gegeben. Solche Veränderungen könnten aber eine zukünftige Notwendigkeit sein.

Tierische Produkte: Ziel der Züchtung ist es über Jahrzehnte gewesen, Produktionsmerkmale zu verbessern: Produktivität der Legehennen, Milchmenge und Milchkomposition bei Rindern, Gewichtszunahme und Fleischqualität bei Schweinen usw. Weitere Verbesserungen stoßen teilweise bereits jetzt an die physiologischen Grenzen der Tiere. Weitere Steigerungen durch gentechnische Maßnahmen zu verfolgen, wäre meist nicht sinnvoll. Dennoch gibt es auch hier Bereiche, in denen gentechnische Ansätze verfolgt werden. Zum Beispiel, um den Nährwert, genauer die Fettkomposition im Fleisch, zu verändern, wurden transgene Schweine erzeugt, die die essentielle Omega-3-Fettsäure produzieren. Dadurch soll die Balance zwischen Omega-6- und Omega-3-Fettsäuren in der Humanernährung und für die menschliche Gesundheit verbessert werden. Das notwendige Desaturase-Transgen (Fat-1) kommt vom Fadenwurm *C. elegans* oder von Pflanzen (FAD2 vom Spinat), kann daher nicht durch Züchtung eingebracht werden. Weitere Beispiele sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tab. 4 Genetisch modifizierte Nutztiere mit neuartigen Merkmalen

Gen	Merkmal	Spezies	Referenz
Bovines α -Lactalbumin	Nährwertverbesserung der Milch	Schwein	WHEELER et al. 2001
Humanes Lactoferrin	Zusammensetzung der Milch	Rind	HYVÖNEN et al. 2006
Humanes Lysozym	Gesundheit (Euter), Milchverarbeitung	Ziege, Rind	MAGA et al. 2006 YANG et al. 2011
Bovines β - und κ -Casein	erhöhter Molkeanteil	Rind	BROPHY et al. 2003
β -Lactoglobulin-Knockdown	allergenarme Milch	Rind	JABED et al. 2012
Desaturase (<i>C. elegans</i>)	erhöhter Omega-3-Fettsäuregehalt	Schwein, Rind	LAI et al. 2006 GUO et al. 2011
Desaturase (Spinat)	erhöhter Omega-3-Fettsäuregehalt	Schwein	SAEKI et al. 2004
Wachstumshormon	Größenzunahme, weniger Fett	Schwein	CIFONE et al. 2002
Myostatin-Knockdown	Muskelfleisch (Fleischqualität)	Rind, Schaf	TESSANE et al. 2012 TANG et al. 2012
Insulina.-Wachstumsfaktor	Größenzunahme, weniger Fett	Schwein	PURSEL et al. 2004
Insulina.-Wachstumsfaktor	erhöhtes Wollwachstum	Schaf	DAMAK et al. 1996
Keratin (Intermed. Filament)	verbesserte Woll-Qualität	Schaf	BAWDEN et al. 1998

Wie bereits mehrfach erwähnt, gilt auch hier, wenn der genetische Hintergrund des Merkmals bekannt ist und wenn das Merkmal auf einem Einzelgen oder einer kleinen Anzahl an Loci beruht, sind genetische Manipulation oder Gentransfer realistische Optionen, neue Merkmale einzubringen oder bestehende zu verbessern. Bei quantitativen Merkmalen ist eine Vielzahl von Genen an der Ausprägung des Merkmals beteiligt. Um gezielt in dieses Netzwerk eingreifen zu können, müssen genaue Kenntnisse vorliegen, wie die Gene miteinander interagieren oder koordiniert reguliert werden. Heute ist bekannt, dass Mikro-RNA-Moleküle (miRNAs) eine Rolle bei der Regulation vieler biologischer Prozesse spielen (GURTAN und SHARP 2013) und einzelne miRNAs multiple Gene regulieren. Mit steigender Kenntnis über die Mikro-RNA ist absehbar, dass mit ihnen ganze Netzwerke von Genen beeinflusst werden könnten.

Welches Risiko ist mit Lebensmittelprodukten von GM-Tieren verbunden? Die Zulassung von GM-Futter- oder -Lebensmitteln unterliegt strikten gesetzlichen Regelungen, einschließlich Risikobewertung. Nur gesunde Tiere können für die Lebensmittelerzeugung eingesetzt werden. Das bedeutet, dass die genetische Veränderung keine negative Auswirkung auf die tierische Gesundheit, Reproduktionsfähigkeit usw. haben darf, andernfalls würde dies auch aus wirtschaftlichen Gründen für den Landwirt keinen Sinn machen. Effekte der genetischen Manipulation lassen sich molekular sehr gut analysieren. Zudem sind die Kosten für die Genomsequenzierung drastisch gesunken, so dass man ungewollte Veränderungen ausschließen kann. Zuchterfolge beruhen häufig auf Mutationen, die ein gewünschtes Merkmal verbessern. Dies sind zufällige Mutationen, für die anschließend selektioniert wird. Würde man die gleiche Mutation gezielt ins Genom einbringen, gibt es realistisch gesehen keinen Unterschied für die Lebensmittelsicherheit.

5. Öffentliche Akzeptanz

Biotechnologische Eingriffe am Tier werden kontrovers diskutiert. In der Öffentlichkeit herrscht eine grundsätzliche Zurückhaltung gegenüber allen Möglichkeiten der Gentechnik. Die Verfügbarkeit von Schlüsseltechnologien allein ist kein ausreichender Grund, um genetisch modifizierte Tiere zu erzeugen. Jedes Vorhaben erfordert eine objektive Abwägung von Nutzen und Risiko, wobei dem Wohlbefinden des Tieres eine hohe Priorität eingeräumt werden muss.

Im Bereich der Medizin verlangt die Öffentlichkeit zunehmend, dass die neuen Medikamente und Verfahren sicher, effektiv und baldmöglichst verfügbar sind. Jedoch besteht andererseits großer öffentlicher Druck, den Einsatz von Versuchstieren in der Biomedizin zu reduzieren. Gegner von Tierversuchen tendieren zu der Behauptung, dass alles notwendige Wissen aus *In-vitro*-Versuchen, etwa mit Zellkulturen, erhalten werden könnte. Leider ist das nicht der Fall. Es gibt kein *In-vitro*-System, das als ein vollständiges Modell die Physiologie des gesamten Organismus widerspiegeln könnte. Manche Untersuchungen am Tier sind deshalb auch in absehbarer Zukunft unvermeidlich. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Eingriffe in das Tier auch qualitativ hochwertige Informationen liefern, die direkt der menschlichen Gesundheit und dem Wohlergehen zugute kommen. Das wiederum unterstreicht die Notwendigkeit genetisch definierter, gut charakterisierter und physiologisch vergleichbarer Tiermodelle für die Untersuchungen zu menschlichen Krankheiten und zur regenerativen Medizin.

Gentechnologie kann potenziell für die Landwirtschaft und auch für den Verbraucher von Nutzen sein. Die aktuelle öffentliche Meinung in Europa, aber auch in anderen Teilen der Welt, stellt sich jedoch massiv gegen gentechnisch veränderte Tiere und Nahrungsmittel. In Bereichen, in denen langfristige Vorteile für die Umwelt, die menschliche oder tierische Gesundheit und das Wohlbefinden zu erwarten sind, bietet die Gentechnologie jedoch zweifellos leistungsstarke und präzise Werkzeuge. Mit zunehmender Weltbevölkerung und steigenden Erwartungen an den Wohlstand wächst die Nachfrage nach Lebensmitteln tierischer Herkunft. Gleichzeitig nehmen die Konkurrenz hinsichtlich der Land- und Wasserressourcen sowie Herausforderungen durch Klimawandel zu und erfordern eine effizientere Tierproduktion. Kann es sich die Gesellschaft wirklich leisten, neue Möglichkeiten und Technologien zur Sicherstellung der Lebensmittelversorgung zu ignorieren?

Literatur

- AL-MASHHADI, R. H., SØRENSEN, C. B., KRAGH, P. M., CHRISTOFFERSEN, C., MORTENSEN, M. B., TOLBOD, L. P., THIM, T., DU, Y., LI, J., LIU, Y., MOLDT, B., SCHMIDT, M., VAJTA, G., LARSEN, T., PURUP, S., BOLUND, L., NIELSEN, L. B., CALLESEN, H., FALK, E., MIKKELSEN, J. G., and BENTZON, J. F.: Familial hypercholesterolemia and atherosclerosis in cloned minipigs created by DNA transposition of a human PCSK9 gain-of-function mutant. *Sci. Transl. Med.* 5, 166ra1 (2013)
- BAWDEN, C. S., POWELL, B. C., WALKER, S. K., and ROGERS, G. E.: Expression of a wool intermediate filament keratin transgene in sheep fibre alters structure. *Transgenic Res.* 7, 273–287 (1998)
- BROPHY, B., SMOLENSKI, G., WHEELER, T., WELLS, D., L'HUILLIER, P., and LAIBLE, G.: Cloned transgenic cattle produce milk with higher levels of beta-casein and kappa-casein. *Nature Biotechnol.* 21, 157–162 (2003)
- BUEHR, M., MEEK, S., BLAIR, K., YANG, J., URE, J., SILVA, J., MCLAY, R., HALL, J., YING, Q. L., and SMITH, A.: Capture of authentic embryonic stem cells from rat blastocysts. *Cell* 135, 1287–1298 (2008)
- CAPECCHI, M. R.: Gene targeting in mice: functional analysis of the mammalian genome for the twenty-first century. *Nature Rev. Genet.* 6, 507–512 (2005)
- CARLSON, D. F., TAN, W., LILICO, S. G., STVERAKOVA, D., PROUDFOOT, C., CHRISTIAN, M., VOYTAS, D. F., LONG, C. R., WHITELAW, C. B., and FAHRENKRUG, S. C.: Efficient TALEN-mediated gene knockout in livestock. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109, 17382–17387 (2012)
- CHEN, R., XUE, G., CHEN, P., YAO, B., YANG, W., MA, Q., FAN, Y., ZHAO, Z., TARCZYNSKI, M. C., and SHI, J.: Transgenic maize plants expressing a fungal phytase gene. *Transgenic Res.* 17, 633–643 (2008)
- CIFONE, D., DOMINICI, F. P., PURSEL, V. G., and TURYN, D.: Inability of heterologous growth hormone (GH) to regulate GH binding protein in GH-transgenic swine. *J. Anim. Sci.* 80, 1962–1969 (2002)
- CLARK, A. J., BISSINGER, P., BULLOCK, D. W., DAMAK, S., WALLACE, R., WHITELAW, C. B., and YULL, F.: Chromosomal position effects and the modulation of transgene expression. *Reprod. Fertil. Dev.* 6, 589–598 (1994)
- CLARK, K. J., CARLSON, D. F., and FAHRENKRUG, S. C.: Pigs taking wing with transposons and recombinases. *Genome Biol.* 8, Suppl. 1, S13 (2007)
- CLARK, K. J., VOYTAS, D. F., and EKKER, S. C.: A TALE of two nucleases: gene targeting for the masses? *Zebrafish* 8, 147–149 (2011)
- CONG, L., RAN, F. A., COX, D., LIN, S., BARRETTO, R., HABIB, N., HSU, P. D., WU, X., JIANG, W., MARRAFFINI, L. A., and ZHANG, F.: Multiplex genome engineering using CRISPR/Cas systems. *Science* 339, 819–823 (2013)
- COWAN, P. J.: Coagulation and the xenograft endothelium. *Xenotransplantation* 14, 7–12 (2007)
- DAI, Y., VAUGHT, T. D., BOONE, J., CHEN, S. H., PHELPS, C. J., BALL, S., MONAHAN, J. A., JOBST, P. M., MCCREATH, K. J., LAMBORN, A. E., COWELL-LUCERO, J. L., WELLS, K. D., COLMAN, A., POLEJAEVA, I. A., and AYARES, D. L.: Targeted disruption of the alpha1,3-galactosyltransferase gene in cloned pigs. *Nature Biotechnol.* 20, 251–255 (2002)
- DAMAK, S., SU, H., JAY, N. P., and BULLOCK, D. W.: Improved wool production in transgenic sheep expressing insulin-like growth factor 1. *Biotechnology (NY)* 14, 185–188 (1996)

- ELLIOTT, R. B., ESCOBAR, L., TAN, P. L., MUZINA, M., ZWAIN, S., and BUCHANAN, C.: Live encapsulated porcine islets from a type 1 diabetic patient 9.5 yr after xenotransplantation. *Xenotransplantation* *14*, 157–161 (2007)
- FARINAS, C. S., LEITE, A., and MIRANDA, E. A.: Aqueous extraction of recombinant human proinsulin from transgenic maize endosperm. *Biotechnol. Prog.* *21*, 1466–1471 (2005)
- FLISIKOWSKA, T., MERKL, C., LANDMANN, T., ESER, S., REZAEI, N., CUI, X., KUROME, M., ZAKHARTCHENKO, V., KESSLER, B., WIELAND, H., ROTTMANN, O., SCHMID, R.M., SCHNEIDER, G., KIND, A., WOLF, E., SAUR, D., and SCHNIEKE, A.: A porcine model of familial adenomatous polyposis. *Gastroenterology* *143*, 1173–1175 (2012)
- FLISIKOWSKA, T., THOREY, I. S., OFFNER, S., ROS, F., LIFKE, V., ZEITLER, B., ROTTMANN, O., VINCENT, A., ZHANG, L., JENKINS, S., NIEBSBACH, H., KIND, A. J., GREGORY, P. D., SCHNIEKE, A. E., and PLATZER, J.: Efficient immunoglobulin gene disruption and targeted replacement in rabbit using zinc finger nucleases. *PLoS One* *6*, e21045 (2011)
- GEURTS, A. M., COST, G. J., FREYVERT, Y., ZEITLER, B., MILLER, J. C., CHOI, V. M., JENKINS, S. S., WOOD, A., CUI, X., MENG, X., VINCENT, A., LAM, S., MICHALKIEWICZ, M., SCHILLING, R., FOECKLER, J., KALLOWAY, S., WEILER, H., MÉNORET, S., ANEGON, I., DAVIS, G. D., ZHANG, L., REBAR, E. J., GREGORY, P. D., URNOV, F. D., JACOB, H. J., and BUELOW, R.: Knockout rats via embryo microinjection of zinc-finger nucleases. *Science* *325*, 433 (2009)
- GOLOVAN, S. P., MEIDINGER, R. G., AJAKAIYE, A., COTTRILL, M., WIEDERKEHR, M. Z., BARNEY, D. J., PLANTE, C., POLLARD, J. W., FAN, M. Z., HAYES, M. A., LAURSEN, J., HJORTH, J. P., HACKER, R. R., PHILLIPS, J. P., and FORSBERG, C. W.: Pigs expressing salivary phytase produce low-phosphorus manure. *Nature Biotech.* *19*, 741–745 (2001)
- GROSSE-HOVEST, L., MÜLLER, S., MINOIA, R., WOLF, E., ZAKHARTCHENKO, V., WENIGERKIND, H., LASSNIG, C., BESENFELDER, U., MÜLLER, M., LYTTON, S. D., JUNG, G., and BREM, G.: Cloned transgenic farm animals produce a bispecific antibody for T cell-mediated tumor cell killing. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *101*, 6858–6863 (2004)
- GUO, T., LIU, X. F., DING, X. B., YANG, F. F., NIE, Y. W., AN, Y. J., and GUO, H.: Fat-1 transgenic cattle as a model to study the function of ω -3 fatty acids. *Lipids Health Dis.* *10*, 244 (2011)
- GURTAN, A. M., and SHARP, P. A.: The role of miRNAs in regulating gene expression networks. *J. Mol. Biol.* doi:pii: S0022–2836(13)00154-X. 10.1016/j.jmb.2013.03.007. [Epub ahead of print] (2013)
- HAEFNER, S., KNIETSCH, A., SCHOLTEN, E., BRAUN, J., LOHSCHIEDT, M., and ZELDER, O.: Biotechnological production and applications of phytases. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* *68*, 588–597 (2005)
- HAMMER, R. E., PURSEL, V. G., REXROAD, C. E. Jr., WALL, R. J., BOLT, D. J., EBERT, K. M., PALMITER, R. D., and BRINSTER, R. L.: Production of transgenic rabbits, sheep and pigs by microinjection. *Nature* *315*, 680–683 (1985)
- HANSEN, P. J.: Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Anim. Reprod. Sci.* *82–83*, 349–360 (2004)
- HAO, Y. H., YONG, H. Y., MURPHY, C. N., WAX, D., SAMUEL, M., RIEKE, A., LAI, L., LIU, Z., DURTSCHI, D. C., WELBERN, V. R., PRICE, E. M., McALLISTER, R. M., TURK, J. R., LAUGHLIN, M. H., PRATHER, R. S., and RUCKER, E. B.: Production of endothelial nitric oxide synthase (eNOS) over-expressing piglets. *Transgenic Res.* *15*, 739–750 (2006)
- HE, J., YE, J., LI, Q., FENG, Y., BAI, X., CHEN, X., WU, C., YU, Z., ZHAO, Y., HU, X., and LI, N.: Construction of a transgenic pig model overexpressing polycystic kidney disease 2 (PKD2) gene. *Transgenic Res.* Jan 13 [Epub ahead of print] (2013)
- HOFMANN, A., KESSLER, B., EWERLING, S., WEPPERT, M., VOGG, B., LUDWIG, H., STOJKOVIC, M., BOELHAUVE, M., BREM, G., WOLF, E., and PFEIFER, A.: Efficient transgenesis in farm animals by lentiviral vectors. *EMBO Rep.* *4*, 1054–1060 (2003)
- HUANG, B., LI, T., ALONSO-GONZALEZ, L., GORRE, R., KEATLEY, S., GREEN, A., TURNER, P., KALLINGAPPA, P. K., VERMA, V., and OBACK, B.: A virus-free poly-promoter vector induces pluripotency in quiescent bovine cells under chemically defined conditions of dual kinase inhibition. *PLoS One* *6*, e24501 (2011)
- HUGGETT, B., HODGSON, J. and LÄHTEENMÄKI, R.: Public biotech 2009—the numbers. *Nature Biotechnol.* *28*, 793–799 (2010)
- HYVÖNEN, P., SUOJALA, L., HAARANEN, J., WRIGHT, A. VON, and PYÖRÄLÄ, S.: Human and bovine lactoferrins in the milk of recombinant human lactoferrin-transgenic dairy cows during lactation. *Biotechnol. J.* *1*, 410–412 (2006)

- JABED, A., WAGNER, S., MCCrackEN, J., WELLS, D. N., and LAIBLE, G.: Targeted microRNA expression in dairy cattle directs production of β -lactoglobulin-free, high-casein milk. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *109*, 16811–16816 (2012)
- JAKOBOVITS, A., AMADO, R. G., YANG, X., ROSKOS, L., and SCHWAB, G.: From XenoMouse technology to panitumumab, the first fully human antibody product from transgenic mice. *Nature Biotechnol.* *25*, 1134–1143 (2007)
- KAMIONKA, M.: Engineering of therapeutic proteins production in *Escherichia coli*. *Curr. Pharm. Biotechnol.* *12*, 268–274 (2011)
- KASHIWAKURA, Y., MIMURO, J., ONISHI, A., IWAMOTO, M., MADOIWA, S., FUCHIMOTO, D., SUZUKI, S., SUZUKI, M., SEMBON, S., ISHIWATA, A., YASUMOTO, A., SAKATA, A., OHMORI, T., HASHIMOTO, M., YAZAKI, S., and SAKATA, Y.: Porcine model of hemophilia A. *PLoS ONE* *7*, e49450 (2012)
- KIND, A., and SCHNIEKE, A.: Animal pharming, two decades on. *Transgenic Res.* *17*, 1025–1033 (2008)
- KLYMIUK, N., AIGNER, B., BREM, G., and WOLF, E.: Genetic modification of pigs as organ donors for xenotransplantation. *Mol. Reprod. Dev.* *77*, 209–221 (2010)
- KLYMIUK, N., MUNDHENK, L., KRAEHE, K., WUENSCH, A., PLOG, S., EMRICH, D., LANGENMAYER, M. C., STEHR, M., HOLZINGER, A., KRÖNER, C., RICHTER, A., KESSLER, B., KUROME, M., EDDICKS, M., NAGASHIMA, H., HEINRITZL, K., GRUBER, A. D., and WOLF, E.: Sequential targeting of CFTR by BAC vectors generates a novel pig model of cystic fibrosis. *J. Mol. Med. (Berl.)* *90*, 597–608 (2012)
- KRAFT, T. W., ALLEN, D., PETTERS, R. M., HAO, Y., PENG, Y. W., and WONG, F.: Altered light responses of single rod photoreceptors in transgenic pigs expressing P347L or P347S rhodopsin. *Mol. Vis.* *11*, 1246–1256 (2005)
- KRAGH, P. M., NIELSEN, A. L., LI, J., DU, Y., LIN, L., SCHMIDT, M., BØGH, I. B., HOLM, I. E., JAKOBSEN, J. E., JOHANSEN, M. G., PURUP, S., BOLUND, L., VAJTA, G., and JØRGENSEN, A. L.: Hemizygous minipigs produced by random gene insertion and handmade cloning express the Alzheimer's disease-causing dominant mutation APP^{sw}. *Transgenic Res.* *18*, 545–558 (2009)
- KUROIWA, Y., KASINATHAN, P., SATHIYASEELAN, T., JIAO, J. A., MATSUSHITA, H., SATHIYASEELAN, J., WU, H., MELLQUIST, J., HAMMITT, M., KOSTER, J., KAMODA, S., TACHIBANA, K., ISHIDA, I. and ROBL, J. M.: Antigen-specific human polyclonal antibodies from hyperimmunized cattle. *Nature Biotechnol.* *27*, 173–181 (2009)
- LAI, L., KANG, J. X., LI, R., WANG, J., WITT, W. T., YONG, H. Y., HAO, Y., WAX, D. M., MURPHY, C. N., RIEKE, A., SAMUEL, M., LINVILLE, M. L., KORTE, S. W., EVANS, R. W., STARZL, T. E., PRATHER, R. S., and DAI, Y.: Generation of cloned transgenic pigs rich in omega-3 fatty acids. *Nature Biotechnol.* *24*, 435–436 (2006)
- LAVINE, G.: FDA approves first biological product derived from transgenic animal. *Amer. J. Health Syst. Pharm.* *66*, 518 (2009)
- LAVITRANO, M., BUSNELLI, M., CERRITO, M. G., GIOVANNONI, R., MANZINI, S., and VARGIOLU, A.: Sperm-mediated gene transfer. *Reprod. Fertil. Dev.* *18*, 19–23 (2006)
- LEUCHS, S., SAALFRANK, A., MERKL, C., FLISIKOWSKA, T., EDLINGER, M., DURKOVIC, M., REZAEI, N., KUROME, M., ZAKHARTCHENKO, V., KESSLER, B., FLISIKOWSKI, K., KIND, A., WOLF, E., and SCHNIEKE, A.: Inactivation and inducible oncogenic mutation of p53 in gene targeted pigs. *PLoS ONE* *7*, e43323 (2012)
- LI, P., TONG, C., MEHRAN-SHAI, R., JIA, L., WU, N., YAN, Y., MAXSON, R. E., SCHULZE, E. N., SONG, H., HSIEH, C. L., PERA, M. F., and YING, Q. L.: Germline competent embryonic stem cells derived from rat blastocysts. *Cell* *135*, 1299–1310 (2008)
- LUO, Y., LI, J., LIU, Y., LIN, L., DU, Y., LI, S., YANG, H., VAJTA, G., CALLESEN, H., BOLUND, L., and SØRENSEN, C. B.: High efficiency of BRCA1 knockout using rAAV-mediated gene targeting: developing a pig model for breast cancer. *Transgenic Res.* *20*, 975–988 (2011)
- LYALL, J., IRVINE, R. M., SHERMAN, A., MCKINLEY, T. J., NÚÑEZ, A., PURDIE, A., OUTTRIM, L., BROWN, I. H., ROLLESTON-SMITH, G., SANG, H., and TILEY, L.: Suppression of avian influenza transmission in genetically modified chickens. *Science* *331*, 223–226 (2011)
- MAGA, E. A., CULLOR, J. S., SMITH, W., ANDERSON, G. B., and MURRAY, J. D.: Human lysozyme expressed in the mammary gland of transgenic dairy goats can inhibit the growth of bacteria that cause mastitis and the cold-spoilage of milk. *Foodborne Pathog. Dis.* *3*, 384–392 (2006)
- MALI, P., YANG, L., ESVELT, K. M., AACH, J., GUELL, M., DICARLO, J. E., NORVILLE, J. E., and CHURCH, G. M.: RNA-guided human genome engineering via Cas9. *Science* *339*, 823–826 (2013)
- MCCREATH, K. J., HOWCROFT, J., CAMPBELL, K. H. S., COLMAN, A., SCHNIEKE, A. E., and KIND, A. J.: Production of gene-targeted sheep by nuclear transfer from cultured somatic cells. *Nature* *405*, 1066–1069 (2000)
- MEDUGORAC, I., SEICHTER, D., GRAF, A., RUSS, I., BLUM, H., GÖPEL, K. H., ROTHAMMER, S., FÖRSTER, M., and KREBS, S.: Bovine polledness – an autosomal dominant trait with allelic heterogeneity. *PLoS One* *7*, e39477 (2012)

- MENDICINO, M., RAMSOONDAR, J., PHELPS, C., VAUGHT, T., BALL, S., LEROITH, T., MONAHAN, J., CHEN, S., DANDRO, A., BOONE, J., JOBST, P., VANCE, A., WERTZ, N., BERGMAN, Z., SUN, X. Z., POLEJAEVA, I., BUTLER, J., DAI, Y., AYARES, D., and WELLS, K.: Generation of antibody- and B cell-deficient pigs by targeted disruption of the J-region gene segment of the heavy chain locus. *Transgenic Res.* 20, 625–641 (2011)
- MOISYADI, S., KAMINSKI, J. M., and YANAGIMACHI, R.: Use of intracytoplasmic sperm injection (ICSI) to generate transgenic animals. *Comp. Immunol. Microbiol. Infect. Dis.* 32, 47–60 (2009)
- MULSANT, P., LECERF, F., FABRE, S., SCHIBLER, L., MONGET, P., LANNELUC, I., PISSELET, C., RIQUET, J., MONNIAUX, D., CALLEBAUT, I., CRIBIU, E., THIMONIER, J., TEYSSIER, J., BODIN, L., COGNÉ, Y., CHITOUR, N., and ELSÉN, J. M.: Mutation in bone morphogenetic protein receptor-IB is associated with increased ovulation rate in Booroola Mérimo ewes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 98, 5104–5109 (2001)
- NOYES, H., BRASS, A., OBARA, I., ANDERSON, S., ARCHIBALD, A. L., BRADLEY, D. G., FISHER, P., FREEMAN, A., GIBSON, J., GICHERU, M., HALL, L., HANOTTE, O., HULME, H., MCKEEVER, D., MURRAY, C., OH, S. J., TATE, C., SMITH, K., TAPIO, M., WAMBUGU, J., WILLIAMS, D. J., AGABA, M., and KEMP, S. J.: Genetic and expression analysis of cattle identifies candidate genes in pathways responding to *Trypanosoma congolense* infection. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108, 9304–9309 (2011)
- PANT, S. D., SCHENKEL, F. S., LEYVA-BACA, I., SHARMA, B. S., and KARROW, N. A.: Identification of single nucleotide polymorphisms in bovine CARD15 and their associations with health and production traits in Canadian Holsteins. *BMC Genomics* 8, 421 (2007)
- PETTERS, R. M., ALEXANDER, C. A., WELLS, K. D., COLLINS, E. B., SOMMER, J. R., BLANTON, M. R., ROJAS, G., HAO, Y., FLOWERS, W. L., BANIN, E., CIDECIYAN, A. V., JACOBSON, S. G., and WONG, F.: Genetically engineered large animal model for studying cone photoreceptor survival and degeneration in retinitis pigmentosa. *Nature Biotechnol.* 15, 965–970 (1997)
- PURSEL, V. G., MITCHELL, A. D., BEE, G., ELSASSER, T. H., MCMURTRY, J. P., WALL, R. J., COLEMAN, M. E., and SCHWARTZ, R. J.: Growth and tissue accretion rates of swine expressing an insulin-like growth factor I transgene. *Anim. Biotechnol.* 15, 33–45 (2004)
- RENNER, S., BRAUN-REICHHART, C., BLUTKE, A., HERBACH, N., EMRICH, D., STRECKEL, E., WUNSCH, A., KESSLER, B., KUROME, M., BÄHR, A., KLYMIUK, N., KREBS, S., PUK, O., NAGASHIMA, H., GRAW, J., BLUM, H., WANKE, R., and WOLF, E.: Permanent neonatal diabetes in INSC94Y transgenic pigs. *Diabetes*. Dec 28 2012 [Epub ahead of print]
- RENNER, S., FEHLINGS, C., HERBACH, N., HOFMANN, A., WALDTHAUSEN, D. C. VON, KESSLER, B., ULRICHS, K., CHODNEVSKAJA, I., MOSKALENKO, V., AMSELGRUBER, W., GÖKE, B., PFEIFER, A., WANKE, R., and WOLF, E.: Glucose intolerance and reduced proliferation of pancreatic beta-cells in transgenic pigs with impaired glucose-dependent insulinotropic polypeptide function. *Diabetes* 59, 1228–1238 (2010)
- RICHT, J. A., KASINATHAN, P., HAMIR, A. N., CASTILLA, J., SATHIYASEELAN, T., VARGAS, F., SATHIYASEELAN, J., WU, H., MATSUSHITA, H., KOSTER, J., KATO, S., ISHIDA, I., SOTO, C., ROBL, J. M., and KUROIWA, Y.: Production of cattle lacking prion protein. *Nature Biotechnol.* 25, 132–138 (2007)
- ROGERS, C. S., STOLTZ, D. A., MEYERHOLZ, D. K., OSTEDGAARD, L. S., ROKHLINA, T., TAFT, P. J., ROGAN, M. P., PEZZULO, A. A., KARP, P. H., ITANI, O. A., KABEL, A. C., WOHLFORD-LENANE, C. L., DAVIS, G. J., HANFLAND, R. A., SMITH, T. L., SAMUEL, M., WAX, D., MURPHY, C. N., RIEKE, A., WHITWORTH, K., UC, A., STARNER, T. D., BROGDEN, K. A., SHILYANSKY, J., MCCRAY, P. B. JR., ZABNER, J., PRATHER, R. S., and WELSH, M. J.: Disruption of the CFTR gene produces a model of cystic fibrosis in newborn pigs. *Science* 321, 1837–1841 (2008)
- SAEKI, K., MATSUMOTO, K., KINOSHITA, M., SUZUKI, I., TASAKA, Y., KANO, K., TAGUCHI, Y., MIKAMI, K., HIRABAYASHI, M., KASHIWAZAKI, N., HOSOI, Y., MURATA, N., and IRITANI, A.: Functional expression of a Delta12 fatty acid desaturase gene from spinach in transgenic pigs. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 101, 6361–6366 (2004)
- SAINSBURY, F., SACK, M., STADLMANN, J., QUENDLER, H., FISCHER, R., and LOMONOSOFF, G. P.: Rapid transient production in plants by replicating and non-replicating vectors yields high quality functional anti-HIV antibody. *PLoS One* 5, e13976 (2010)
- SAR, C., MWENYA, B., SANTOSO, B., TAKAURA, K., MORIKAWA, R., ISOGAI, N., ASAKURA, Y., TORIDE, Y., and TAKAHASHI, J.: Effect of *Escherichia coli* wild type or its derivative with high nitrite reductase activity on *in vitro* ruminal methanogenesis and nitrate/nitrite reduction. *J. Anim. Sci.* 83, 644–652 (2005)
- SCHNIEKE, A. E., KIND, A. J., RITCHIE, W. A., MYCOCK, K., SCOTT, A. R., RITCHIE, M., WILMUT, I., COLMAN, A., and CAMPBELL, K. H. S.: Human factor IX transgenic sheep produced by transfer of nuclei from transfected fetal fibroblasts. *Science* 278, 2130–2133 (1997)

- SEOK, J., WARREN, H. S., CUENCA, A. G., MINDRINOS, M. N., BAKER, H. V., XU, W., RICHARDS, D. R., McDONALD-SMITH, G. P., GAO, H., HENNESSY, L., FINNERTY, C. C., LÓPEZ, C. M., HONARI, S., MOORE, E. E., MINEI, J. P., CUSCHIERI, J., BANKEY, P. E., JOHNSON, J. L., SPERRY, J., NATHENS, A. B., BILLIAR, T. R., WEST, M. A., JESCHKE, M. G., KLEIN, M. B., GAMELLI, R. L., GIBRAN, N. S., BROWNSTEIN, B. H., MILLER-GRAZIANO, C., CALVANO, S. E., MASON, P. H., COBB, J. P., RAHME, L. G., LOWRY, S. F., MAIER, R. V., MOLDAWER, L. L., HERNDON, D. N., DAVIS, R. W., XIAO, W., and TOMPKINS, R. G.: Genomic responses in mouse models poorly mimic human inflammatory diseases. Inflammation and host response to injury, large scale collaborative research program. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *110*, 3507–3512 (2013)
- SHIMIZU, A., and YAMADA, K.: Histopathology of xenografts in pig to non-human primate discordant xenotransplantation. *Clin. Transplant.* *24*, Suppl. 22, 11–15 (2010)
- SOMMER, J. R., ESTRADA, J. L., COLLINS, E. B., BEDELL, M., ALEXANDER, C. A., YANG, Z., HUGHES, G., MIR, B., GILGER, B. C., GROB, S., WEI, X., PIEDRAHITA, J. A., SHAW, P. X., PETTERS, R. M., and ZHANG, K.: Production of ELOVL4 transgenic pigs: a large animal model for Stargardt-like macular degeneration. *Br. J. Ophthalmol.* *95*, 1749–1754 (2011)
- SUZUKI, S., IWAMOTO, M., SAITO, Y., FUCHIMOTO, D., SEMBON, S., SUZUKI, M., MIKAWA, S., HASHIMOTO, M., AOKI, Y., NAJIMA, Y., TAKAGI, S., SUZUKI, N., SUZUKI, E., KUBO, M., MIMURO, J., KASHIWAKURA, Y., MADOIWA, S., SAKATA, Y., PERRY, A. C., ISHIKAWA, F., and ONISHI, A.: Il2rg gene-targeted severe combined immunodeficiency pigs. *Cell Stem Cell* *10*, 753–758 (2012)
- TAKAHASHI, K., and YAMANAKA, S.: Induction of pluripotent stem cells from mouse embryonic and adult fibroblast cultures by defined factors. *Cell* *126*, 663–676 (2006)
- TANG, D., ZHU, H., WU, J., CHEN, H., ZHANG, Y., ZHAO, X., CHEN, X., DU, W., WANG, D., and LIN, X.: Silencing myostatin gene by RNAi in sheep embryos. *J. Biotechnol.* *158*, 69–74 (2012)
- TESSANNE, K., GOLDING, M. C., LONG, C. R., PEOPLES, M. D., HANNON, G., and WESTHUSIN, M. E.: Production of transgenic calves expressing an shRNA targeting myostatin. *Mol. Reprod. Dev.* *79*, 176–185 (2012)
- TSENG, Y. L., KUWAKI, K., DOR, F. J., SHIMIZU, A., HOUSER, S., HISASHI, Y., YAMADA, K., ROBSON, S. C., AWWAD, M., SCHUURMAN, H. J., SACHS, D. H., and COOPER, D. K.: Alpha1,3-galactosyltransferase gene-knockout pig heart transplantation in baboons with survival approaching 6 months. *Transplantation* *80*, 1493–1500 (2005)
- UMEYAMA, K., WATANABE, M., SAITO, H., KUROME, M., TOHI, S., MATSUNARI, H., MIKI, K., and NAGASHIMA, H.: Dominant-negative mutant hepatocyte nuclear factor 1alpha induces diabetes in transgenic-cloned pigs. *Transgenic Res.* *18*, 697–706 (2009)
- VAN VEEN, H. A., KOITER, J., VOGEELEZANG, C. J., VAN WESSEL, N., VAN DAM, T., VELTEROP, I., VAN HOUTD, K., KUPERS, L., HORBACH, D., SALAHEDDINE, M., NUIJENS, J. H., and MANNESSE, M. L.: Characterization of recombinant human C1 inhibitor secreted in milk of transgenic rabbits. *J. Biotechnol.* *162*, 319–326 (2012)
- WALL, R. J., POWELL, A. M., PAAPE, M. J., KERR, D. E., BANNERMAN, D. D., PURSEL, V. G., WELLS, K. D., TALBOT, N., and HAWK, H. W.: Genetically enhanced cows resist intramammary *Staphylococcus aureus* infection. *Nature Biotechnol.* *23*, 445–451 (2005)
- WEFERS, B., MEYER, M., ORTIZ, O., HRABÉ DE ANGELIS, M., HANSEN, J., WURST, W., and KÜHN, R.: Direct production of mouse disease models by embryo microinjection of TALENs and oligodeoxynucleotides. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* *110*, 3782–3787 (2013)
- WEST, F. D., UHL, E. W., LIU, Y., STOWE, H., LU, Y., YU, P., GALLEGOS-CARDENAS, A., PRATT, S. L., and STICE, S. L.: Brief report: chimeric pigs produced from induced pluripotent stem cells demonstrate germline transmission and no evidence of tumor formation in young pigs. *Stem Cells* *29*, 1640–1643 (2011)
- WHEELER, M. B., BLECK, G. T., and DONOVAN, S. M.: Transgenic alteration of sow milk to improve piglet growth and health. *Reprod. Suppl.* *58*, 313–324 (2001)
- WHITELAW, C. B., RADCLIFFE, P. A., RITCHIE, W. A., CARLISLE, A., ELLARD, F. M., PENNA, R. N., ROWE, J., CLARK, A. J., KING, T. J., and MITROPHANOUS, K. A.: Efficient generation of transgenic pigs using equine infectious anaemia virus (EIAV) derived vector. *FEBS Lett.* *571*, 233–236 (2004)
- WHYTE, J. J., SAMUEL, M., MAHAN, E., PADILLA, J., SIMMONS, G. H., ARCE-ESQUIVEL, A. A., BENDER, S. B., WHITWORTH, K. M., HAO, Y. H., MURPHY, C. N., WALTERS, E. M., PRATHER, R. S., and LAUGHLIN, M. H.: Vascular endothelium-specific overexpression of human catalase in cloned pigs. *Transgenic Res.* *20*, 989–1001 (2011)
- WILMUT, I., SCHNIEKE, A. E., McWHIR, J., KIND, A. J., and CAMPBELL, K. H.: Viable offspring derived from fetal and adult mammalian cells. *Nature* *385*, 810–813 (1997)

- YAMADA, K., YAZAWA, K., SHIMIZU, A., IWANAGA, T., HISASHI, Y., NUHN, M., O'MALLEY, P., NOBORI, S., VAGEFI, P. A., PATIENCE, C., FISHMAN, J., COOPER, D. K., HAWLEY, R. J., GREENSTEIN, J., SCHURMAN, H. J., AWWAD, M., SYKES, M., and SACHS, D. H.: Marked prolongation of porcine renal xenograft survival in baboons through the use of alpha1,3-galactosyltransferase gene-knockout donors and the cotransplantation of vascularized thymic tissue. *Nature Med.* *11*, 32–34 (2005)
- YANG, B., WANG, J., TANG, B., LIU, Y., GUO, C., YANG, P., YU, T., LI, R., ZHAO, J., ZHANG, L., DAI, Y., and LI, N.: Characterization of bioactive recombinant human lysozyme expressed in milk of cloned transgenic cattle. *PLoS One* *6*, e17593 (2011)
- YANG, D., WANG, C. E., ZHAO, B., LI, W., OUYANG, Z., LIU, Z., YANG, H., FAN, P., O'NEILL, A., GU, W., YI, H., LI, S., LAI, L., and LI, X. J.: Expression of Huntington's disease protein results in apoptotic neurons in the brains of cloned transgenic pigs. *Hum. Mol. Genet.* *19*, 3983–3994 (2010)
- YANG, Y. G., and SYKES, M.: Xenotransplantation: current status and a perspective on the future. *Nature Rev. Immunol.* *7*, 519–531 (2007)

Prof. Dr. Angelika SCHNIEKE
Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan
Lehrstuhl für Biotechnologie der Nutztiere
Liesel-Beckmann-Straße 1
85354 Freising
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 8161 712004
Fax: +49 8161 712108
E-Mail: schnieke@wzw.tum.de

Globale Energiewende – Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung¹

Ottmar EDENHOFER und Christian FLACHSLAND (Potsdam)

Mit 10 Abbildungen



¹ Der Beitrag folgt einer Veröffentlichung in englischer Sprache: EDENHOFER, O., and FLACHSLAND, C.: Transforming the global energy system – Pathways towards a sustainable energy supply. In: DEBIEL, T., HIPPLER J., RÖTH, M., and ULBERT, C. (Eds.): Global Trends 2013, Peace – Development – Environment. Bonn: Stiftung Entwicklung und Frieden (SEF) 2012; mit freundlicher Genehmigung der S. Fischer Verlag GmbH.

Zusammenfassung

Bisher ist es nicht gelungen, das Wirtschaftswachstum vom Anstieg der Treibhausgasemissionen zu entkoppeln und damit die Erderwärmung mit ihren potenziell katastrophalen Konsequenzen zu begrenzen. Im Gegenteil: Die globalen Emissionen wachsen ungebremst. Daher sind Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels erforderlich. Insbesondere das globale Energiesystem muss zügig durch geeignete Politikmaßnahmen dekarbonisiert werden. Die Ablagerung von Emissionen in der Atmosphäre darf nicht länger kostenlos sein, und die Erneuerbaren Energien müssen durch eine geeignete Technologiepolitik gefördert werden. Doch besonders Schwellenländer bauen im Zuge des Wirtschaftswachstums ihre Energiesysteme weiter auf fossiler Basis aus.

Der für die globale Energieversorgung langfristig limitierende Faktor ist nicht die Endlichkeit fossiler Rohstoffe, sondern das globale Gemeinschaftsgut Atmosphäre als Deponie für Emissionen. Wenn der Klimawandel begrenzt werden soll, ist die Atmosphäre aber in wenigen Dekaden „voll“. Damit stehen die Klimaverhandlungen vor großen politischen Herausforderungen, die insbesondere durch die unvermeidliche Umverteilung von Renteneinkommen aus fossilen Rohstoffen entstehen. In mehreren Weltregionen sind aber bereits erste Schritte eines energiepolitischen Umsterns erkennbar.

Abstract

It has not yet been possible to decouple economic growth from rising greenhouse gas (GHG) emissions and thus limit global warming with its potentially catastrophic consequences. On the contrary, global emissions are rising unabated. Actions to mitigate climate change are therefore required. In particular, appropriate policy measures are needed to expedite the decarbonisation of the global energy system. The use of the atmosphere as a dumping ground disposal space for emissions must no longer be cost-free, and renewable energies must be promoted through appropriate technology policies. However, the emerging economies in particular are continuing to base the expansion of their energy systems on fossil fuels in pursuit of economic growth.

Over the long term, the limiting factor for the global energy supply is not that fossil fuels will become scarce, but that the atmosphere's ability to absorb additional greenhouse gases is finite. The atmosphere is a global common pool resource which is currently being used as a waste disposal site for emissions. If humankind is to have any chance of mitigating climate change, however, we must accept that the atmosphere's absorption capacities will be exhausted within a few decades, when the atmosphere will be "full". This presents the climate negotiations with major political challenges, relating primarily in particular to the need for redistribution of rents from fossil resources. In several regions of the world, however, initial steps towards an energy policy turnaround can already be discerned.

Bisher ist es nicht gelungen, das Wirtschaftswachstum vom Anstieg der Treibhausgasemissionen zu entkoppeln und damit die Erderwärmung mit ihren potenziell katastrophalen Konsequenzen zu begrenzen. Im Gegenteil: Die globalen Emissionen wachsen ungebremst. Daher sind Maßnahmen zur Begrenzung des Klimawandels erforderlich. Insbesondere das globale Energiesystem muss zügig durch geeignete Politikmaßnahmen dekarbonisiert werden. Die Ablagerung von Emissionen darf nicht länger kostenlos sein, und die Erneuerbaren Energien müssen durch eine geeignete Technologiepolitik gefördert werden. Doch besonders Schwellenländer bauen im Zuge des Wirtschaftswachstums ihre Energiesysteme weiter auf fossiler Basis aus.

Der für die globale Energieversorgung langfristig limitierende Faktor ist jedoch nicht die Endlichkeit fossiler Rohstoffe, sondern das globale Gemeinschaftsgut Atmosphäre als Deponie für Emissionen. Wenn der Klimawandel begrenzt werden soll, ist die Atmosphäre aber in wenigen Dekaden „voll“. Damit stehen die Klimaverhandlungen vor großen politischen Herausforderungen, die insbesondere durch die unvermeidliche Umverteilung von Renteneinkommen aus fossilen Rohstoffen entstehen. In mehreren Weltregionen sind aber bereits erste Schritte eines energiepolitischen Umsterns erkennbar.

1. Treiber und Optionen zur Reduktion von CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen des globalen Energiesystems steigen seit Beginn der industriellen Revolution im 19. Jahrhundert kontinuierlich an (vgl. Abb. 1).

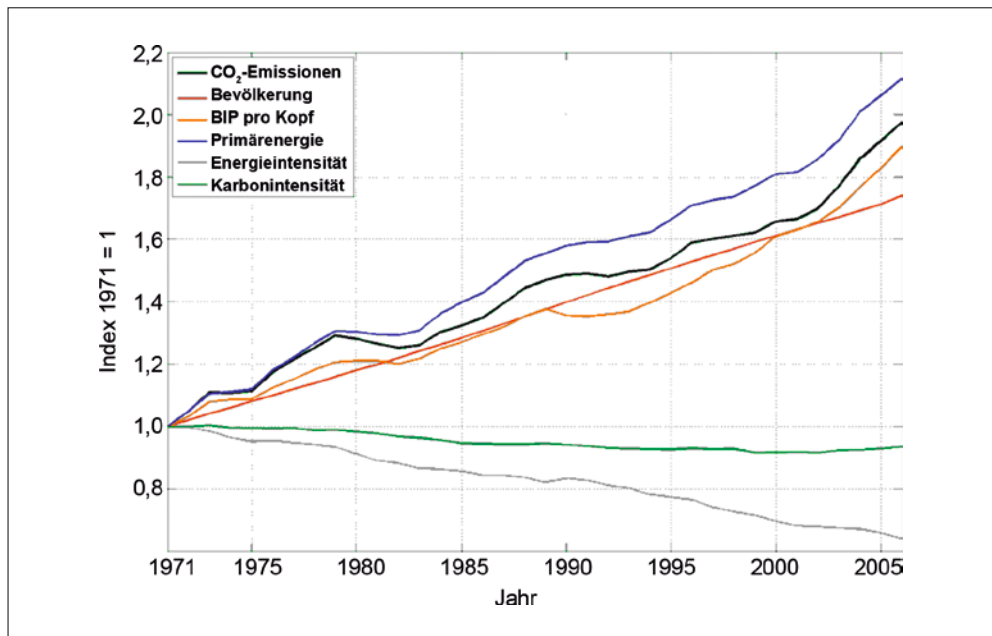


Abb. 1 Anstieg der globalen CO₂-Emissionen trotz sinkender Energieintensität der Weltwirtschaft – Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum als treibende Faktoren der globalen CO₂-Emissionen. (Quelle: IEA 2011a, b)

Vier treibende Faktoren können dabei unterschieden werden (vgl. Abb. 2): Das Wachstum der globalen Bevölkerung, die Zunahme der Pro-Kopf-Wirtschaftsleistung, die Energieintensität der globalen Wirtschaft sowie die Emissionsintensität des globalen Energiesystems. Die Energie- und die Emissionsintensität sind in den vergangenen Dekaden zwar gefallen, wurden durch Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum allerdings deutlich überkompensiert (vgl. Abb. 1). In den letzten Jahren ist die CO₂-Intensität durch den massiven Ausbau der Kohlenutzung insbesondere in China – hier haben sich die CO₂-Emissionen zwischen 2002 und 2008 auf 7 Mrd. Tonnen (= Gigat = Gt) verdoppelt – zudem wieder leicht gestiegen.

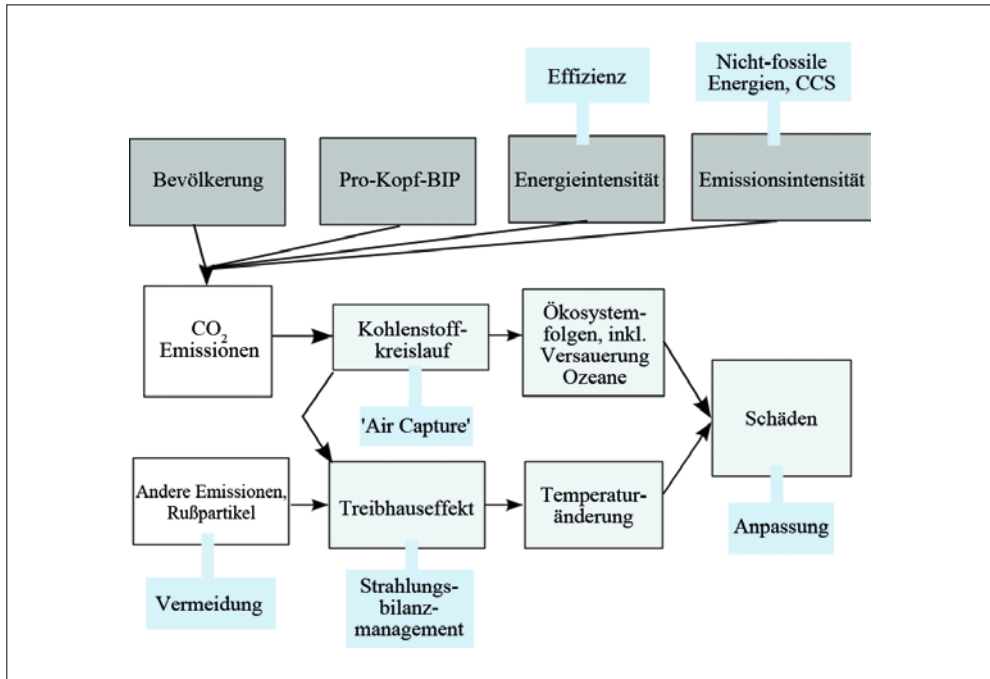


Abb. 2 Treiber und Optionsraum zur Lösung des Klimaproblems. (Quelle: EDENHOFER und SEYBOTH 2013)

Mit den vier Ursachen der Emissionen sind auch die wichtigsten Optionen zur Reduktion von Emissionen im Energiesystem benannt. Die Option der Begrenzung des globalen Bevölkerungswachstums durch politische Maßnahmen wirft aber ethische Fragen auf. Eine Stabilisierung der Weltbevölkerung wird allerdings bis Mitte des 21. Jahrhunderts erwartet (UN 2009). Die Begrenzung oder Reduktion des Sozialproduktes ist mit Blick auf die legitimen Wachstumswünsche in den Entwicklungsländern – gerade auch im Hinblick auf ihre Versorgung mit Energie – ebenfalls ethisch kaum vertretbar. Daher sind die zentralen Optionen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen im Energiesystem die Verbesserung der Energie- und Emissionsintensität. Die Energieintensität kann durch effizientere Technologien sowie eine Veränderung von Konsummustern weg von energieintensiven Aktivitäten hin etwa zu Dienstleistungen vermindert werden. Die Emissionsintensität kann durch den Austausch von fossilen Energieträgern etwa gegen Erneuerbare Energien, die CCS-Technologie („Carbon Capture and Storage“ – CCS; vgl. Kasten 1) oder Nuklearenergie gesenkt werden. So ist

durchaus denkbar, dass eine größer werdende Weltbevölkerung mit steigendem Lebensstandard und zunehmendem Energieverbrauch immer weniger Treibhausgasemissionen erzeugt.

Neben der Vermeidung von Emissionen im globalen Energiesystem gibt es eine Reihe von weiteren Ansätzen, um gefährlichen Klimawandel zu vermeiden. Abbildung 2 spannt den gesamten Problem- und Lösungsraum des Klimaproblems auf. So werden zwei häufig unter der Bezeichnung „Geo-engineering“ bezeichnete Verfahren diskutiert: Zum einen lässt sich der Atmosphäre direkt Kohlendioxid entziehen („Air Capture“). Allerdings sind diese Verfahren aller Voraussicht nach deutlich teurer als alternative Optionen zur Emissionsvermeidung (HOUSE et al. 2011). Eine interessante Ausnahme könnte die Verwendung von Biomasse zur Gewinnung von Energie in Kombination mit der Abscheidung und Einlagerung von Kohlendioxid (CCS) sein.

Die zweite Form des Geo-engineering zielt darauf ab, direkt den Treibhauseffekt zu modifizieren und durch Eintrag etwa von Schwefelpartikeln in die Stratosphäre ein Management der solaren Strahlungsbilanz in Richtung einer künstlichen Kühlung der Erdatmosphäre zu erreichen (CRUTZEN 2006). Diese Verfahren sind derzeit allerdings noch Science-Fiction, da sie erstens nicht erprobt und zweitens mit einer Reihe von Gefahren und Unsicherheiten behaftet sind, etwa wenn es durch unvorhersehbare regionale Temperaturschwankungen zu Änderungen regionaler Ernteerträge kommt (Royal Society 2009). Außerdem kann ein Strahlungsbilanzmanagement die Versauerung der Ozeane durch die erhöhte Kohlendioxidaufnahme nicht verhindern, die etwa zu einem Absterben der Korallenriffe führt (WBGU 2006).

Daher wird angesichts der gegenwärtigen politischen Schwierigkeiten der Klimaverhandlungen verstärkt argumentiert, dass lieber auf eine Anpassungsstrategie an den scheinbar unvermeidbaren Klimawandel fokussiert werden sollte (etwa FELD et al. 2011).

Anpassung ist eine zweifellos wichtige Option im Umgang mit unvermeidbarem Klimawandel. Wenn Anpassung allerdings zentrale Säule einer globalen Klimaschutzstrategie sein soll, dann muss gezeigt werden, dass Anpassung auch an Extremereignisse zu moralisch vertretbaren Kosten möglich ist. Die Erfahrungen mit Wirbelstürmen und Überschwemmungen in den vergangenen Jahren in den USA („Katrina“), Australien, Pakistan oder Thailand illustrieren die Schwierigkeiten und Herausforderungen einer solchen Strategie.

Somit bleibt die Vermeidung von Treibhausgasemissionen für die Klimapolitik zentral. Dabei müssen auch die Emissionen von Treibhausgasen wie Methan und Stickstoff zum Beispiel in der Landwirtschaft verringert werden, sowie von Rußpartikeln aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und Biomasse, deren Absorption von Sonnenenergie einen wärmenden Effekt auf die Atmosphäre hat. Außerdem sollten Emissionen aus der Abholzung der Regenwälder – immerhin etwa ein Fünftel der globalen Treibhausgasemissionen – durch den Schutz dieser Wälder vermieden werden.

Mit 60% sind die CO₂-Emissionen des globalen Energiesystems aber die wichtigste Quelle von Treibhausgasen.² Daher konzentriert sich dieser Beitrag auf die Rolle der Dekarbonisierung des globalen Energiesystems.

2. Szenarien zur Entwicklung des globalen Energiesystems

Szenarienrechnungen über die zukünftige Entwicklung des globalen Energiesystems kommen zu dem Schluss, dass der globale Energieverbrauch auf fossiler Basis und damit die

2 BARKER et al. 2007, S. 28.

globalen Emissionen ohne zusätzliche Maßnahmen weiter steigen werden. Um den Anstieg der mittleren atmosphärischen Temperatur gegenüber dem vorindustriellen Wert wie international vereinbart auf 2°C zu stabilisieren, bedarf es einer Trendwende des globalen Emissionswachstums in den nächsten Jahren und deutlicher Emissionsreduktionen in den Dekaden danach. Neben dem ‚Weiter-so‘-Szenario sind verschiedene Reduktionspfade denkbar, die ein 2°C-Ziel mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten erreichen würden (vgl. Abb. 3). Diese Wahrscheinlichkeiten hängen unter anderem davon ab, wie sich die Emissionen anderer Treibhausgase entwickeln werden und welche technischen Möglichkeiten es in Zukunft geben wird, der Atmosphäre bereits emittiertes CO₂ wieder zu entziehen – wie etwa durch Biomasse in Verbindung mit CCS (EDENHOFER et al. 2010a, MEINSHAUSEN et al. 2009). Eine Begrenzung auf 2°C Erderwärmung mit 100% Gewissheit zu erreichen, ist angesichts der historisch bereits getätigten Emissionen praktisch kaum bzw. nur zu sehr hohen Kosten möglich. Selbst der in Abbildung 3 gezeigte Pfad mit 75% Wahrscheinlichkeit ist äußerst ambitioniert, wenn man bedenkt, dass hier ab dem Jahr 2075 *global negative* Emissionen erforderlich sind (etwa durch CCS in Verbindung mit dem Einsatz von Biomasse). In jedem Fall reichen die derzeitig implementierten Energiepolitiken aller Voraussicht nach nicht aus, um ein 2°C-Ziel mit signifikanter Wahrscheinlichkeit zu erreichen (Climateactiontracker.org 2011). Weitere Maßnahmen werden erforderlich sein.

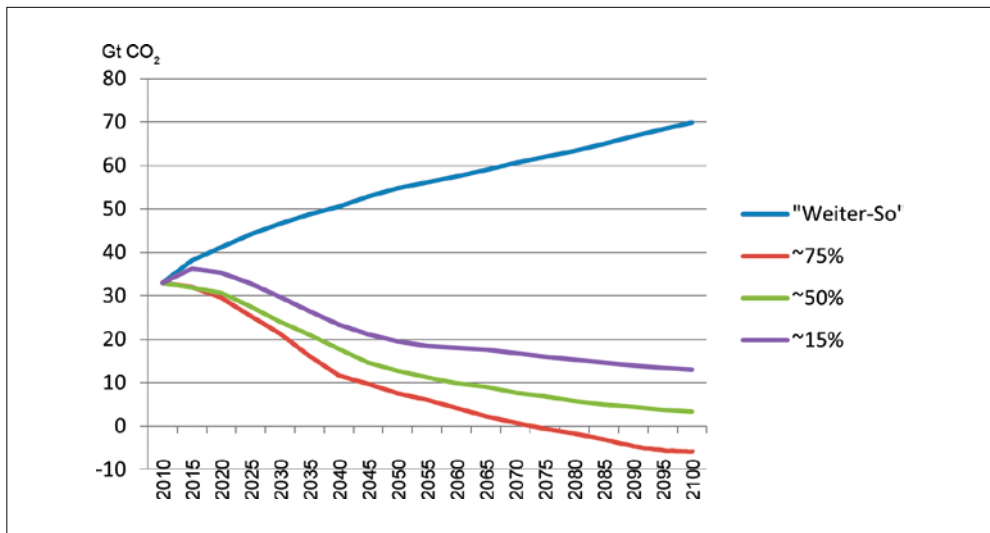


Abb. 3 Die Herausforderung des ambitionierten Klimaschutzes. Projektionen der globalen Emissionen bei einem energiepolitischen ‚Weiter-So‘ gegenüber drei Reduktionspfaden, die das 2°C-Ziel mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten erreichen. Die Differenz zwischen der ‚Weiter-So‘-Entwicklung und den Reduktionspfaden zeigt die ‚Vermeidungslücke‘. (Quelle: EDENHOFER et al. 2010a, S. 23)

Der wichtigste Grund für den erwarteten Anstieg der CO₂-Emissionen ist die weiterhin wachsende Energienachfrage der Schwellenländer (vgl. Abb. 4). Die Internationale Energieagentur erwartet bis zum Jahr 2035 einen Anstieg des globalen Energieverbrauchs von 30% gegenüber dem Jahr 2010. Dabei fallen 50% dieses Zuwachses allein in China und Indien an, wo die Energienachfrage vor allem durch fossile Energieträger gedeckt wird.

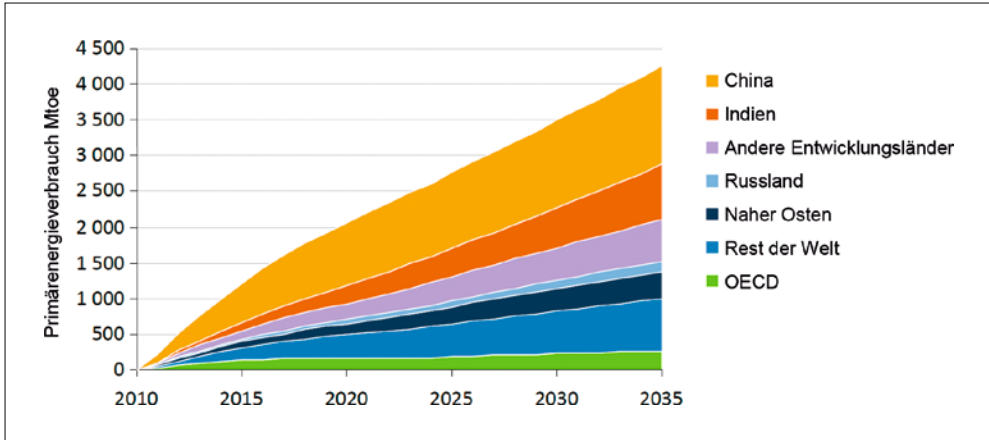


Abb. 4 Stark steigende Energienachfrage in China und Indien. Zuwachs des Primärenergieverbrauchs 2010–2035 nach Regionen. (Quelle: IEA 2011c, S. 3, modifiziert)

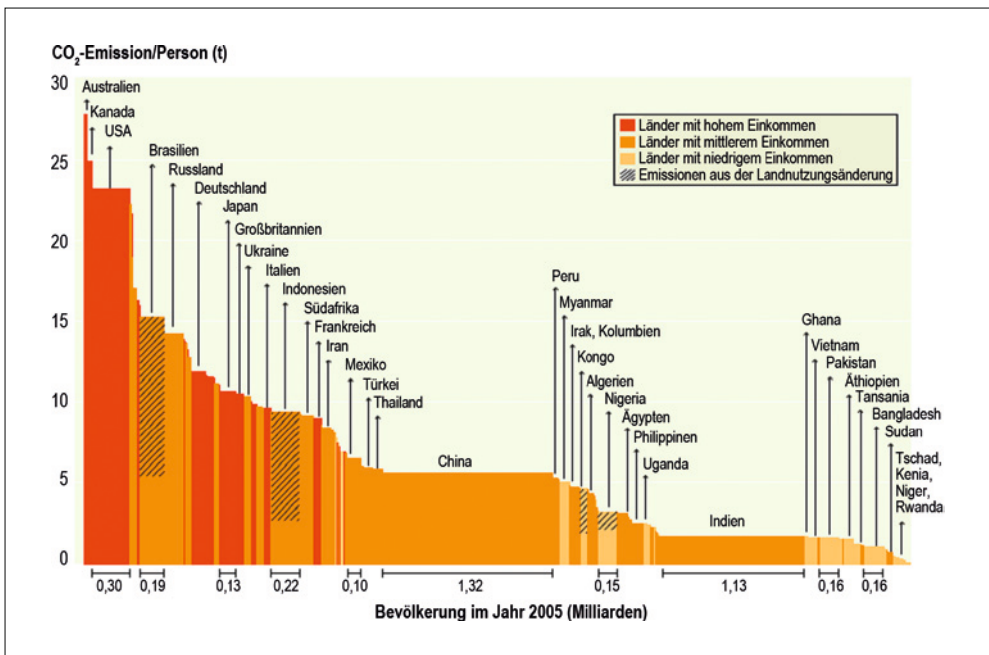


Abb. 5 Die Pro-Kopf-CO₂-Emissionen sind in den Industrieländern besonders hoch. Pro-Kopf-CO₂-Emissionen und Bevölkerung verschiedener Länder und Weltregionen. Die Gesamtfläche unter der Kurve ergibt die Gesamtmenge der globalen CO₂-Emissionen aus dem Energieverbrauch. (Quelle: World Resources Institute 2012)

China und Indien kommt somit eine überragende Bedeutung für den globalen Klimaschutz zu (vgl. auch Abb. 5). In diesen beiden Ländern lebt mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung. Ein Anstieg der Emissionen in diesen Ländern auf das Pro-Kopf-Niveau der USA

oder Deutschlands würde ein 2°C-Ziel praktisch unerreichbar machen und zu einer Erderwärmung von mehreren Grad Celsius führen. Da es keinen offensichtlichen Grund gibt, warum Deutschland und andere reiche Industrienationen ein Recht auf größere Pro-Kopf-Emissionen haben sollten als andere Länder, wird die Verantwortung gerade der reichen Länder bei der Suche nach einem nachhaltigeren und global verallgemeinerbaren Energie- und Wirtschaftssystem deutlich.

3. Die Atmosphäre als limitierender Faktor

Die Atmosphäre ist ein globales Gemeinschaftsgut: Derzeit kann sie fast überall auf der Welt kostenlos als Deponie für Treibhausgasemissionen genutzt werden. Allerdings führt ihre Übernutzung zu einem gefährlichen und potenziell katastrophalen Klimawandel. So könnten bereits jenseits von 2°C-Erderwärmung über dem vorindustriellen Niveau irreversible Kippschalter im Erdsystem aktiviert werden, über deren genaue Schwellenwerte Unsicherheit besteht (MESSNER und RAHMSTORF 2010). Dazu gehören u. a. das Abschmelzen des Grönlandeisschildes und des westantarktischen Eisschildes, die langfristig jeweils zu einem Anstieg des globalen Meeresspiegels um mehrere Meter führen können, ein Umkippen der thermohalinen Zirkulation im Nordatlantik und der resultierende Abfall der Durchschnittstemperaturen in Europa, oder ein Austrocknen des Amazonasregenwaldgebietes (LENTON et al. 2008). Die Aktivierung eines jeden dieser Kippschalter könnte das Habitat, in dem die Menschheit seit dem Holozän lebt, schwer schädigen oder gar zerstören. Der genaue Schwellenwert, an dem diese Kippschalter aktiviert werden, ist jedoch ungewiss.

Die internationale Gemeinschaft hat sich auf den Klimakonferenzen von Kopenhagen und Cancún darauf verständigt, die Erderwärmung auf 2°C über dem vorindustriellen Niveau begrenzen zu wollen. Soll dieses Ziel mit einer signifikanten Wahrscheinlichkeit erreicht werden, können bis zum Jahr 2050 noch etwa 750–1100 Gt CO₂ in der Atmosphäre abgelagert werden.³ Im Jahr 2010 emittierte das globale Energiesystem 33 Mrd. t CO₂, Tendenz steigend.⁴ Es ist also leicht auszurechnen, dass die Deponie Atmosphäre in wenigen Jahrzehnten voll ist. Was bedeutet: Die Weltwirtschaft muss in wenigen Jahrzehnten vollständig dekarbonisiert sein. Noch ist derzeit aber nicht erkennbar, dass dies geschehen wird (*Climateactiontracker.org* 2011).

Offenbar schätzen die Staaten das Kostenrisiko drastischer Emissionsreduktionen derzeit als so hoch, dass sie – jenseits von Lippenbekenntnissen – nicht ernsthaft dazu bereit sind, ihre Energiesysteme zu dekarbonisieren. Das 2°C-Ziel spiegelt dann also nicht das tatsächliche Ergebnis der globalen Abwägung zwischen Kosten und Risiken von gefährlichem Klimawandel einerseits und drastischen Emissionsreduktionen andererseits wider. Allerdings kann dann argumentiert werden, dass die Nationalstaaten das Risiko katastrophaler Klimafolgen unterschätzen. So hat der Harvard-Ökonom Martin WEITZMAN (2009) gezeigt, dass die herkömmlichen Methoden der Risiko- und Entscheidungstheorie versagen, wenn mit Klimafolgen gerechnet werden muss, die den Planeten zerstören können – und wenn diese Zerstörung unbedingt verhindert werden soll. Wenn das Vorsichtsprinzip gilt, kann man den zusätzlichen Schaden einer Tonne CO₂ nicht mehr gegen die zusätzli-

3 MEINSHAUSEN et al. 2009.

4 *EU JRC* und *PBL* 2011, S. 1.

chen Kosten der Vermeidung einer Tonne CO₂ abwägen. Aus Sicht des Vorsichtsprinzips sollte der Klimawandel daher zumindest so weit begrenzt werden, dass das Risiko irreversibler und potenziell unendlicher Schäden auf ein Minimum begrenzt wird.

Die Kosten des Klimaschutzes sind dann als eine Versicherung gegen katastrophalen Klimawandel zu verstehen. Auch wenn sich in der Zukunft herausstellen sollte, dass gefährlicher Klimawandel weniger wahrscheinlich ist als befürchtet und die Kosten des Klimaschutzes höher sind als erhofft, ist es in dieser Argumentation rational, sich angesichts des besten heute verfügbaren Wissens gegen eine Menschheitskatastrophe zu versichern.

Das 2 °C-Ziel lässt sich als diejenige Option verstehen, bei der das Risiko von Klimawandel und die Kosten des Klimaschutzes auf ein jeweils möglichst handhabbares Maß reduziert werden. Dabei müssen die Risiken eines gefährlichen Klimawandels gegen die Risiken gefährlicher Emissionsreduktionen – etwa drastische Wachstumseinbußen in Entwicklungsländern – abgewogen werden (EDENHOFER et al. 2010b). Zudem ist das 2 °C-Ziel ein Fokuspunkt, der die Erwartungen der Verhandlungsparteien koordiniert (JAEGER und JAEGER 2010).

4. Optionen und Kosten von Emissionsreduktionen im Energiesystem

Das globale Energiesystem wird von den fossilen Energieträgern dominiert (vgl. Abb. 6). Nuklearenergie stellt gerade einmal 2 % und die Erneuerbaren Energien nur etwa 13 % des globalen Primärenergieverbrauchs (PEV) bereit. Knapp die Hälfte der Nutzung Erneuerbarer Energien – etwa 6 % des globalen PEV – beruht allerdings auf der Nutzung traditioneller Biomasse. Die globale Energienutzung aus moderner Windkraft, Sonne und Geothermie summiert sich auf nur 0,4 %. Damit wird deutlich, dass eine Umstellung des globalen Energiesystems auf Erneuerbare Energien zur Vermeidung von CO₂-Emissionen eine gewaltige Herausforderung darstellt.

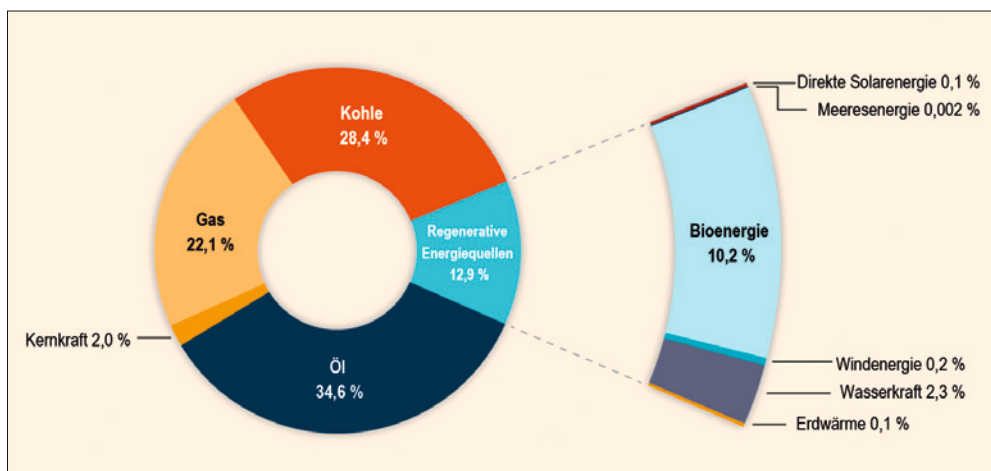


Abb. 6 Fossile Ressourcen decken 85 % des weltweiten Energieverbrauchs. Globaler Primärenergieverbrauch im Jahr 2008. (Quelle: IPCC 2011, S. 10, modifiziert)

Zwei Argumente werden häufig vorgebracht, warum Klimaschutz auch ohne Klimapolitik alleine durch Marktmechanismen realisiert werden könnte. Das erste Argument betont die Knappheit der fossilen Energieträger. Durch den steigenden Energieverbrauch und die Begrenztheit der fossilen Ressourcen würden die Preise der fossilen Energieerzeugung so stark ansteigen, dass schon bald verstärkt Effizienzmaßnahmen und Erneuerbare Energien in den Markt kämen. Dieses Argument übersieht allerdings, dass noch immerhin rund 15 000 Gt CO₂ in Form fossiler Energieträger im Boden lagern, vor allem Kohle (Abb. 7). Kohle lässt sich durch nicht allzu kostspielige Verfahren auch in andere Treibstoffe wie Benzin und Diesel umwandeln. Geht man etwa von einem verbleibenden atmosphärischen CO₂-Budget in der Größenordnung von 750–1100 Gt aus, wird schnell deutlich, dass die Atmosphäre der begrenzende Faktor ist und nicht die fossilen Ressourcen im Boden.

Das zweite Argument setzt auf Kostensenkungen Erneuerbarer Energie durch Lerneffekte, die – so die Hypothese – mit der Zeit auch ohne Politikmaßnahmen billiger werden könnten als fossile Technologien. Einige Erneuerbare Energien können in der Tat bereits heute mit den Kosten fossiler Technologien konkurrieren (IPCC 2011). Es ist aber aus heutiger Sicht überaus zweifelhaft, ob die Kostensenkungen – inklusive der Kosten der Netz-

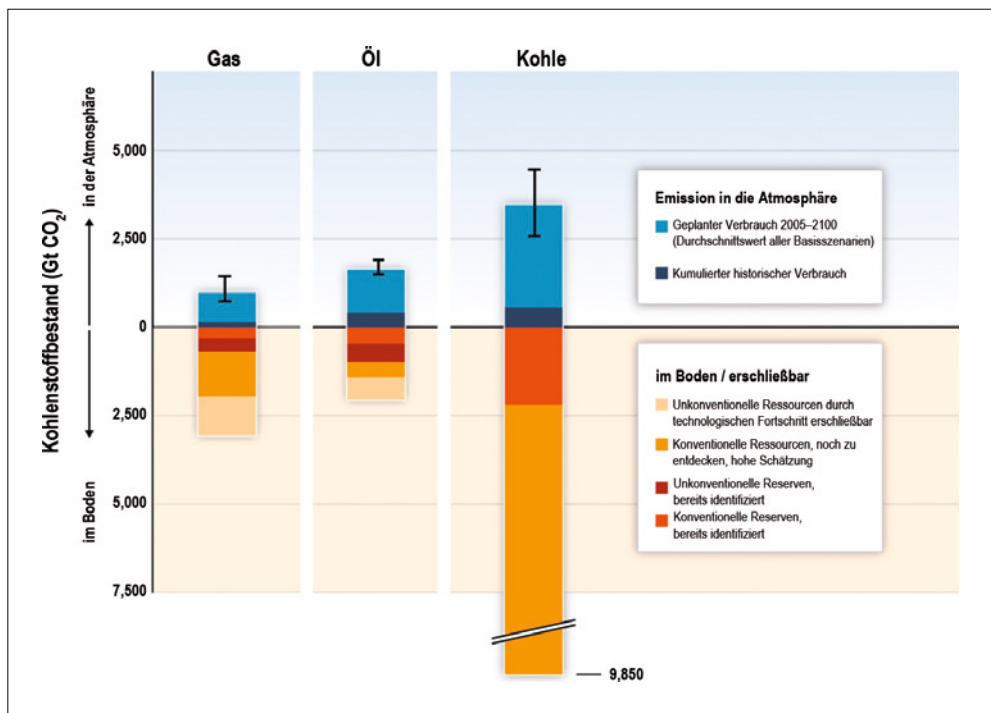


Abb. 7 Die Kohlenstoffvorräte im Boden sind kein begrenzender Faktor. Die hellblauen Säulen zeigen das Mittel der im „Weiter-so“-Szenario bis zum Jahr 2100 erwarteten kumulierten Emissionen in den vom IPCC-Bereich zu Erneuerbaren Energiequellen ausgewerteten Szenarien. Die schwarzen Balken zeigen die Standardabweichung der Szenarien. Insgesamt werden im mittleren „Weiter-so“ bis 2100 etwa 5000 Gt CO₂ emittiert. Zum Vergleich: Bei ambitioniertem Klimaschutz können nur noch etwa 750–1100 Gt Emissionen aus fossilen Energieträgern emittiert werden. (Quelle: MOOMAW et al. 2011, S. 172, modifiziert)

Integration großer Mengen Erneuerbarer Energien – so schnell erfolgen werden, dass eine ambitionierte Klimaschutzpolitik damit obsolet wird.

Mit der Zeit werden zweifellos die Preise der fossilen Energieträger steigen und die Kosten der Erneuerbaren Energien sinken. Nahezu alle Szenarienrechnungen zeigen jedoch, dass dies ohne zusätzliche Politikmaßnahmen nicht schnell genug geschehen wird, um ambitionierte Klimaschutzziele zu erreichen.

In einem exemplarischen „Weiter-so“-Szenario, das am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung mit dem Ökonomie-Energie-Klima-Modell REMIND entwickelt wurde (LEIMBACH et al. 2010), würden – ohne Berücksichtigung der Klimaschäden – durch den massiven Ausbau der kostengünstigen Kohlenutzung bis zum Jahr 2100 insgesamt etwa 5000 Gt CO₂ in die Atmosphäre eingelagert; das 2°C-Ziel würde damit in keinem Fall mehr erreicht (vgl. Abb. 8A). Zwar nimmt der Anteil der Erneuerbaren Energien am

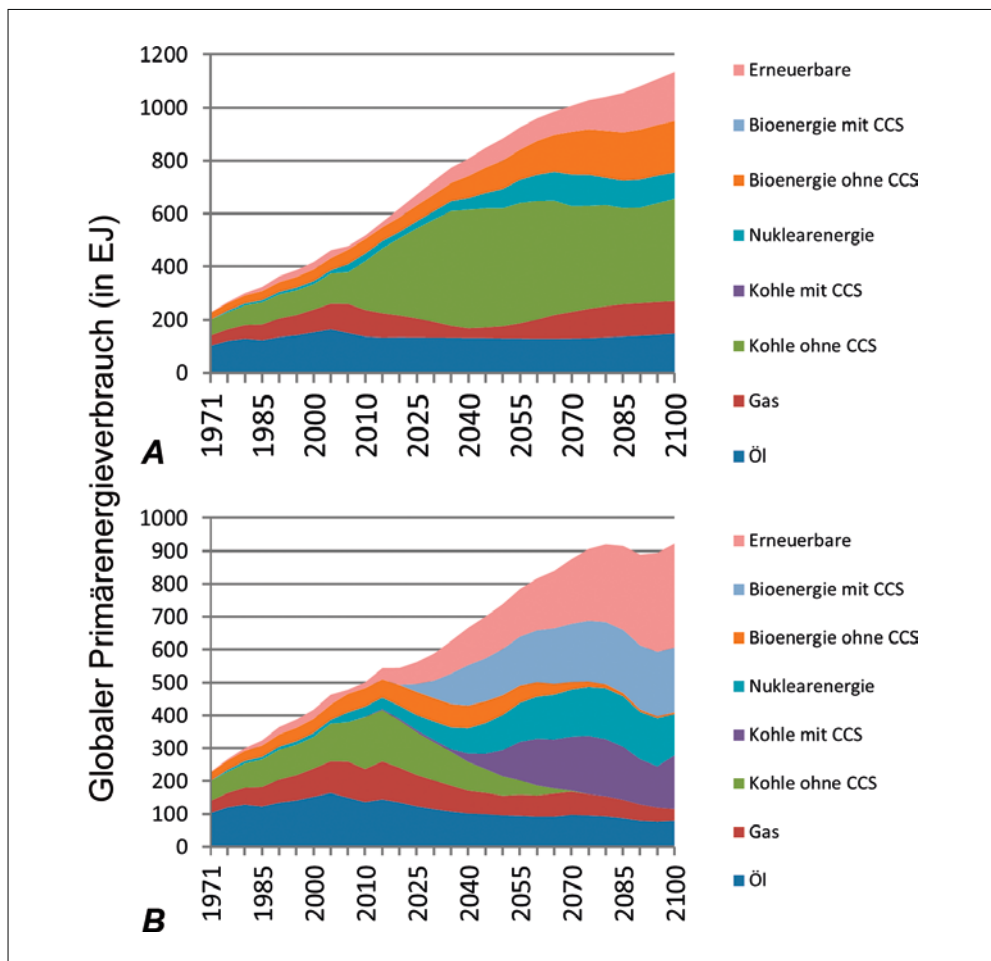


Abb. 8 Ohne Klimapolitik bleiben die fossilen Energieträger dominierend. Globaler Primärenergieverbrauch 1970–2005 historisch und Szenario bis 2100 in einem (A) „Weiter-so“-Szenario ohne Klimapolitik und (B) mit 75 % Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu erreichen. (Quelle: LEIMBACH et al. 2010, S. 121, modifiziert)

globalen Energiemix auch im „Weiter-so“-Szenario aus den genannten Gründen – Preisanstieg der fossilen, Kostensenkung der Erneuerbaren Energien – über die Zeit zu. Der Großteil des globalen Verbrauchs entfällt allerdings auf die Kohle.

Demgegenüber zeigt Abbildung 8B die kostenoptimale Entwicklung des globalen Energiesystems, wenn die Aufnahmekapazität der Atmosphäre durch politische Maßnahmen bis zum Jahr 2100 auf netto 820 Gt CO₂ begrenzt wird. Langfristig würde die Erderwärmung mit 75% Wahrscheinlichkeit auf 2°C begrenzt (vgl. Pfad in Abb. 3).

Neben einer leichten Senkung des globalen Gesamtenergieverbrauchs wird in diesem Szenario vor allem das Energiesystem dekarbonisiert. Die Erneuerbaren Energien (Wind, Solar, Wasser) werden deutlich ausgebaut. Insbesondere wird Biomasse in Verbindung mit CCS (Kasten 1) genutzt, um negative Emissionen zu generieren: Die Pflanzen entziehen der Atmosphäre CO₂, das dann bei der Energiegewinnung in den Untergrund verpresst wird. Kohle wird gegen Ende des Jahrhunderts nur noch in Verbindung mit CCS genutzt. CO₂-Emissionen in die Atmosphäre entstehen nur noch durch die Verwendung von Öl und Gas. Auch die Atomenergie wird ausgebaut, wenn hier keine zusätzlichen Begrenzungen bestehen (vgl. Kasten 2).

Kasten 1: Vor- und Nachteile der CCS-Technologie

Mit „Carbon Capture and Storage“ (CCS) wird die Abscheidung und geologische Verpressung von Kohlendioxid bezeichnet. Das Verfahren kann vor allem bei der Stromerzeugung angewendet werden, aber auch bei der synthetischen Herstellung von Transporttreibstoffen etwa aus Kohle oder Biomasse. Das Hauptrisiko von CCS ist das Entweichen aus unterirdischen Speichern wie etwa salzhaltigen Wasserschichten. Lokale Risiken für Menschen treten auf, falls sich CO₂ in Bodensenken oder Kellern sammelt und eine toxische Luftkonzentration erreicht. Außerdem besteht die Gefahr der Kontamination von Grundwasser durch die Verdrängung salz- und schwermetallhaltiger Wasserschichten. Zudem besteht die Sorge, die Förderung von CCS könnte den Ausbau Erneuerbarer Energien bremsen. Aus globaler Sicht würde ein Wiederaustritt des Kohlendioxids dem Zweck von CCS entgegenwirken, nämlich die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre zu verringern.

Warum sollte CCS angesichts dieser Risiken überhaupt verfolgt werden? Angesichts des massiven Ausbaus der Kohlekraft in China und anderen Ländern und der gewaltigen Herausforderung stringenter Klimaschutzziele spricht vieles dafür, CCS wenigstens zunächst daraufhin zu testen, ob die Risiken beherrschbar sind: Ohne CCS werden nach gegenwärtigem Stand des Wissens ambitionierte Klimaschutzziele volkswirtschaftlich sehr teuer (Abbildung 9B), und damit gerade in Entwicklungsländern nur schwer akzeptierbar. Anders gesagt: Ohne CCS wird ambitionierter Klimaschutz möglicherweise politisch nicht erreichbar sein. Reiche Hochtechnologieländer wie Deutschland sollten diese Technologie daher wenigstens in Pilotprojekten erproben. Für einen ambitionierten Klimaschutz besonders interessant ist dabei die Kombination der Biomassemassennutzung mit CCS, da sich hiermit ‚negative Emissionen‘ erzeugen lassen, also der Atmosphäre netto CO₂ entzogen wird.

Kasten 2: Nuklearenergie

Der Beitrag von gegenwärtig 443 Kernkraftwerken zur globalen Energieversorgung ist mit 2% relativ gering, immerhin 14% des Stromes werden aber weltweit in Kernkraftwerken produziert. Die Risiken der Technologie sind dabei wohlbekannt: die Endlagerfrage, die Gefahren der nuklearen Proliferation, die Kosten des Rückbaus stillgelegter Kraftwerke und die Möglichkeit katastrophaler Unfälle. Zur Illustration: Um den Anteil der Kernenergie bis zum Jahr 2030 auch nur konstant zu halten, müssen bei einer prognostizierten Verdoppelung des Stromverbrauchs etwa 900 Reaktoren installiert sein. Dies würde bedeuten, dass sich nach den gängigen Risikoabschätzungen für Kernkraftwerke heutigen Typs weltweit etwa alle zwölf Jahre ein schwerer Störfall ereignen würde. Es stellt sich die Frage, ob dieses Risiko aus Kostengründen alternativlos ist. Modellrechnungen (Abbildung 9) zeigen, dass beim Verzicht auf Nuklearenergie auch bei ambitioniertem Klimaschutz kaum zusätzliche Kosten anfallen, wenn alternative Technologien – wie Erneuerbare Energien und möglicherweise CCS – zur Verfügung stehen.

Abbildung 9 zeigt Ergebnisse der Klima-Ökonomie-Modelle MERGE, REMIND und POLES, die von Wissenschaftlern des Paul-Scherrer-Instituts, des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und der Universität Grenoble entwickelt worden sind. Die Modelle MERGE und REMIND simulieren regional aufgelöste ökonomische Wachstumsszenarien der globalen Ökonomie und ihres Energiesystems bis zum Jahr 2100 und können damit die makroökonomischen Kosten des Klimaschutzes berechnen. Das Modell POLES ist ein hochaufgelöstes globales Energiesystemmodell und berechnet die erhöhten Energiesystemkosten durch Emissionsvermeidung (siehe EDENHOFER et al. 2010a). Abbildung 9 verdeutlicht, dass die Kosten des Klimaschutzes entscheidend von der Verfügbarkeit von Technologien und dem Ambitionsniveau des Klimaschutzes abhängen. Soll das 2°C-Ziel mit 15% Wahrscheinlichkeit erreicht werden (CO₂-Budget von 2000 Gt bis zum Jahr 2100; vgl. Pfad in Abb. 3), ergeben sich bei Verfügbarkeit aller Technologien Klimaschutzkosten zwischen 0,4 und 1% des globalen BIP im gesamten 21. Jahrhundert (vgl. Abb. 9A). Sind die Erneuerbaren Energien nicht verfügbar, steigen die Klimaschutzkosten in dem Modell MERGE deutlich an. Das Bild wandelt sich, wenn ein sehr ambitionierteres Klimaschutzbudget von 820 Gt CO₂ und ein Erreichen des 2°C-Ziels mit 75% Wahrscheinlichkeit angestrebt wird (Abb. 9B). Zum einen steigen die Kosten des Klimaschutzes in allen Szenarien. Stehen aber Erneuerbare Energien oder CCS nicht zur Verfügung, kann keines der Modelle das Ziel noch rechnerisch erreichen. Die Kostenunterschiede zwischen den Modellen sind auf unterschiedliche Annahmen über die Flexibilität der Energiesysteme zurückzuführen, zum Beispiel die zukünftigen Kostenentwicklungen verschiedener Technologien.

Besonders stark reagieren die Kosten auf die Verfügbarkeit von Biomasse: Ist die Nutzung von Biomasse im Energiesystem nur begrenzt möglich, steigen die Klimaschutzkosten an. Gründe für eine Begrenzung der Biomassenutzung im Energiesystem sind etwa eine Priorisierung landwirtschaftlicher Flächen für den Anbau von Nahrungsmitteln, um hier Preisanstiege zu vermeiden. Außerdem kann eine intensiviertere Landwirtschaft regionale Wasserprobleme verschärfen. Schließlich sind durch eine Ausweitung der Landwirtschaft die Regenwälder als CO₂-Senken und wertvolle Quellen von Biodiversität bedroht.

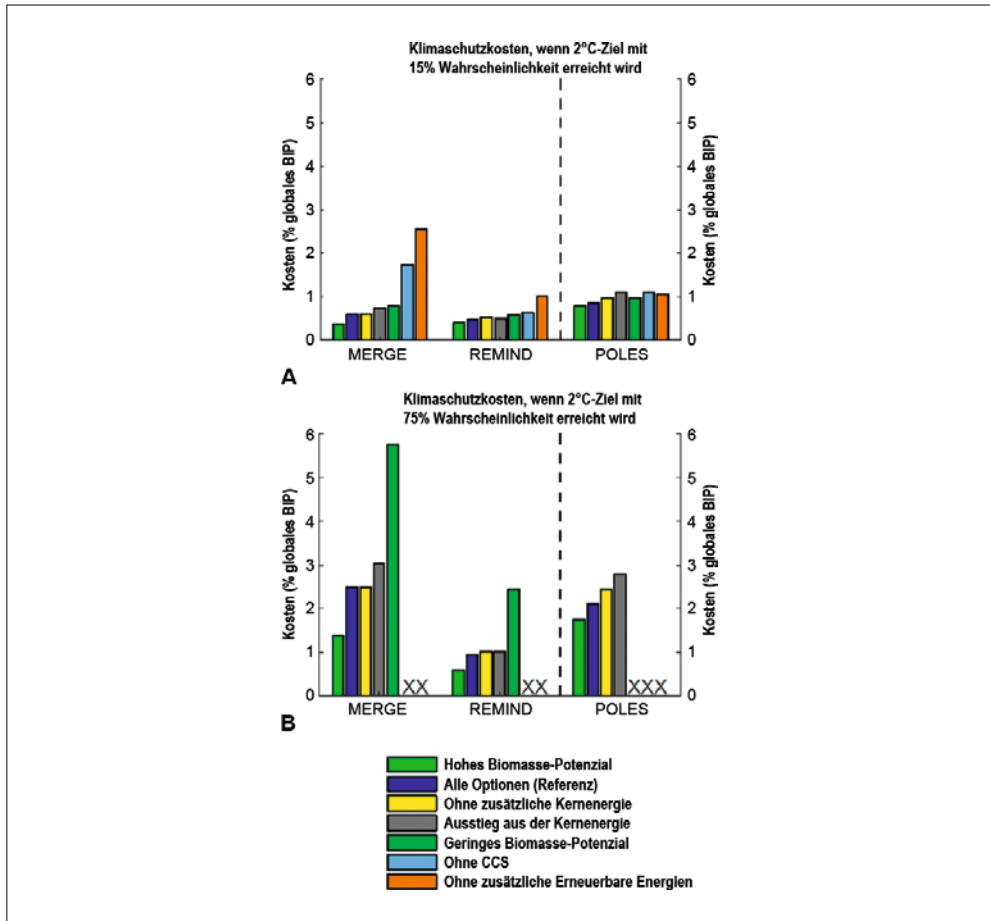


Abb. 9 Ohne Erneuerbare Energien, CCS oder Biomasse wird ambitionierter Klimaschutz kostspielig. Kumulierte Klimaschutzkosten 2005–2100 (Diskontrate 3%) bei unterschiedlichen Verfügbarkeiten von Technologien in zwei Klimaschutzszenarien: Wenn das 2°C-Ziel mit 15% (A) oder 75% (B) Wahrscheinlichkeit erreicht werden soll. (Quelle: EDENHOFER et al. 2010a, S. 37, modifiziert)

Damit zeichnet sich ein Konflikt zwischen kostengünstigem Klimaschutz auf der einen Seite und der Nahrungsmittelversorgung sowie dem Schutz von Ökosystemen und Wäldern auf der anderen Seite ab. Produktivitätssteigernde technische Fortschritte in Richtung einer nachhaltigen Landwirtschaft und ein effektiver globaler Schutz der Regenwälder sind entscheidend dafür, um diesen Konflikt in Zukunft entschärfen zu können.

5. Polit-ökonomische Herausforderungen

Da sich die Begrenzung der Erderwärmung in der Größenordnung von 2°C nicht automatisch durch Marktmechanismen ergeben wird, stellt sich die Frage nach der Wahl und Ausgestaltung von effizienten und fairen Politikmaßnahmen. Ein Preis für Treibhaus-

gasemissionen ist dabei essenziell, um Konsumenten und Produzenten die Kosten der Nutzung der Atmosphäre zu signalisieren und einen Anreiz für die Suche nach Ersatzverfahren und -produkten zu geben. Außerdem gibt es gute Gründe, begleitende Politikinstrumente zur Förderung Erneuerbarer Energien einzusetzen. Da diese Technologien kosteneinsparende Lerneffekte aufweisen (IPCC 2011), die zügig von allen Marktteilnehmern übernommen werden können, hat jede einzelne Firma einen Anreiz, selbst zu wenig in dieses Lernen zu investieren und stattdessen die Lerneffekte anderer Firmen zu kopieren. Die Lernfortschritte sind also ein öffentliches Gut und werden als solches erfahrungsgemäß durch Märkte nur unzureichend bereitgestellt. Einspeisetarife und Quoten für Erneuerbare Energien können dieses Marktversagen, das zusätzlich zum Problem der kostenlosen Nutzbarkeit der Atmosphäre besteht, gezielt adressieren (KALKUHL et al. 2012).

Ein Preis für Emissionen bleibt allerdings unverzichtbar, nicht zuletzt um den sogenannten „Rebound-Effekt“ zu verhindern. Dieser entsteht, wenn Energie durch die Förderung Erneuerbarer Energien oder Effizienzmaßnahmen billiger wird, und daher insgesamt mehr Energie genutzt wird. Ein Emissionspreis kann effizient durch eine Steuer oder durch den Emissionshandel eingeführt werden, wie er seit 2005 für Unternehmen in Europa oder zwischenstaatlich für die 2008–2012 am Kyoto-Protokoll beteiligten Länder existiert. Die Verteilung der knappen und damit wertvollen Emissionszertifikate (Nutzungsrechte an der Atmosphäre) ist dabei politisch kontrovers (EDENHOFER et al. 2011). Zum einen gilt es einen fairen und politisch durchsetzbaren Verteilungsschlüssel etwa zwischen China, den USA, Indien, Afrika, der EU und anderen Ländern zu finden. Zum anderen muss über die Verteilung der Nutzungsrechte über Generationen hinweg entschieden werden. Eine gleiche Pro-Kopf-Verteilung von Emissionsrechten ist dabei ein natürlicher Startpunkt der Diskussion, insofern dabei allen Menschen ein gleiches Recht auf die Nutzung der Atmosphäre zugestanden wird. Allerdings kann diese Regel in einem internationalen Emissionshandelssystem zu erheblichen finanziellen Transfers zwischen den Regionen führen. Um nachteilige polit-ökonomische Effekte analog des aus der Entwicklungsökonomie bekannten „Ressourcenfluchs“ in Ökonomien mit hohen Finanzeinnahmen aus Rohstoffexporten zu vermeiden, sollten entweder Anpassungen in der Verteilungsregel von Zertifikaten oder entsprechende institutionelle Mechanismen zur verantwortungsvollen Verwaltung dieser Einnahmen eingerichtet werden (JAKOB et al. 2012).

Klimaschutz hat eine weitere wichtige polit-ökonomische Implikation: Wird die Nutzung der fossilen Energieträger begrenzt, dann müssen die Besitzer von Kohle, Erdöl und Erdgas einen Teil ihrer Ressourcen im Boden lassen und werden gewissermaßen enteignet (EDENHOFER et al. 2010b, 2011). Es ist also nicht verwunderlich, dass es hier heftigen Widerstand gegen eine ambitionierte Klimapolitik gibt und von interessierter Seite jahrelang Kampagnen gegen den wissenschaftlichen Nachweis des Treibhauseffektes geführt wurden. Eine ähnliche Interessenlage besteht im Falle von Geschäftsmodellen, deren Profitabilität auf der Verwendung billiger fossiler Ressourcen basiert. Die polit-ökonomische Analyse von Klimaschutzinstrumenten weist darauf hin, dass diese Gruppen relativ effektiv ambitionierten Klimaschutz verhindern können, weil sie von den Klimaschutzkosten stark getroffen und gut organisiert sind. Demgegenüber sind die Vorteile des Klimaschutzes eher diffus verteilt und liegen vor allem bei zukünftigen Generationen, die heute nicht am Verhandlungstisch sitzen (VICTOR 2011). Interessengruppen, deren Geschäftsmodell auf Erneuerbaren Energien oder Effizienzmaßnahmen aufbaut und die damit ein Gegenge-

wicht bilden könnten, waren in den vergangenen Jahren in den meisten Weltregionen politisch noch nicht allzu gut organisiert. Diese Balance beginnt sich etwa in Deutschland derzeit offenbar zu verschieben.

Zu diesen Interessenkonflikten gesellt sich das internationale Trittbrettfahrerproblem: Auch wenn es für alle Länder rational ist, sich auf die Einhaltung eines begrenzten globalen Budgets der Nutzung der Atmosphäre zu einigen und so gefährlichen Klimawandel zu vermeiden, würde es sich für jedes einzelne Land lohnen, wenn nur die anderen Länder Klimaschutz betreiben würden und es selber etwas mehr emittiert – wodurch das globale Klima nicht erheblich belastet würde. Der Anreiz dazu steigt noch dadurch, dass durch eine globale Begrenzung der Nachfrage nach fossilen Ressourcen deren Preise fallen und ihre Nutzung ökonomisch noch attraktiver wird. Wenn aber alle so denken würden und daher niemand Emissionen reduziert, kann das Budget nicht eingehalten werden.

Besteht angesichts all dieser Herausforderungen also überhaupt berechnete Hoffnung auf eine Lösung des Klimaproblems? Die letzten UN-Klimakonferenzen von Kopenhagen, Cancún und Durban von 2009 bis 2011 haben gezeigt, dass es zwar die globale Absichtserklärung gibt, die Erderwärmung auf 2 °C zu begrenzen. Die Summe der angekündigten Einzelmaßnahmen der Länder allerdings reicht nicht aus, um dieses Ziel zu erreichen (*Climateactiontracker.org* 2011). Ein Abkommen zur Zuteilung regionaler Emissionsbudgets als Nachfolger des Kyoto-Protokolls ist in diesen Verhandlungen gescheitert.

Die Ökonomie-Nobelpreisträgerin Elinor OSTROM konnte in ihrem Werk zeigen, dass lokale Gemeinschaften unter bestimmten Bedingungen auch ohne Eingreifen eines Zentralstaates zu einem effektiven und effizienten Management lokaler Gemeinschaftsgüter in der Lage sind (z. B. OSTROM et al. 1994). Ob dieser Befund auch auf der globalen Ebene gilt, auf der es ebenfalls keinen Zentralstaat gibt, ist derzeit aber noch eine offene Frage. Immerhin gibt es jedoch eine Reihe von theoretischen Überlegungen und empirischen Indizien, dass eine Bewirtschaftung globaler Gemeinschaftsgüter zunächst auch durch dezentrale Ansätze möglich ist – selbst wenn man davon ausgeht, dass alle Akteure sich rational-eigennützig verhalten. So können Länder finanzielle Transfers zur Kompensation von Klimaschutzkosten vereinbaren, etwa im Rahmen von verknüpften regionalen Emissionshandelssystemen oder durch den *Green Climate Fund*, der Klimaschutzmaßnahmen in ärmeren Ländern finanzieren soll und u. a. von Deutschland unterstützt wird (*High Level Advisory Group* 2010). Die Verknüpfung von Klimaschutz mit Forschungsk Kooperationen oder Sanktionsmechanismen kann ebenfalls helfen, Klimaabkommen zu stabilisieren (LESSMANN et al. 2009, LESSMANN und EDENHOFER 2011). Analysiert man die Klimaverhandlungen als ein wiederholtes Spiel, in dem die Länder ihre Handlungen wechselseitig beobachten und ihr eigenes Verhalten an Handlungen der anderen in der Vergangenheit anpassen können, ergeben sich ebenfalls deutlich bessere Aussichten auf Kooperation als in den einfachsten ökonomischen Standardanalysen (HEITZIG et al. 2011). Zudem können Emissionsreduktionen positive Zusatzeffekte zeitigen, wie etwa reduzierte Luftverschmutzung (IPCC 2011) oder den Aufbau von Erneuerbaren Energieindustrien, mit denen in einer Welt mit ambitioniertem Klimaschutz neue Wirtschaftszweige erschlossen werden können. Auf diesem Argument basiert zu einem guten Teil die Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland in den vergangenen Jahren, mit der zudem ein wichtiger Beitrag zur globalen Kostenreduktion Erneuerbarer Energien geleistet wurde.

6. Regionale Vorreiter für einen polyzentrischen Ordnungsrahmen

Vor diesem Hintergrund haben sich auch ohne ein ambitioniertes globales Klimaabkommen in den letzten Jahren einige interessante regionale Entwicklungen ergeben. So haben die Investitionen in Erneuerbare Energien in mehreren Weltregionen deutlich zugenommen. Dabei hat die Finanzkrise in Europa und den USA sichtbare Spuren hinterlassen, wobei die Investitionen in den USA – wo es eine Reihe von Förderprogrammen auch auf regionaler Ebene gibt (*REN21* 2011) – zuletzt wieder zugenommen haben (vgl. Abb. 10). Zählt man allerdings kleinere Projekte von weniger als einem Megawatt im Bereich Photovoltaik (PV) hinzu (in Abb. 10 nicht berücksichtigt), dann sind vor allem in Deutschland durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2010 zusätzliche 34 Mrd. US-Dollar in dezentrale PV-Anlagen investiert worden. Insgesamt sind die jährlichen globalen Investitionen in Erneuerbare Energien zwischen 2004 und 2010 von 33 auf 211 Mrd. US-Dollar deutlich angestiegen.⁵

Nach Europa beginnen nun auch Australien, Südkorea, Kalifornien, die kanadische Provinz Quebec und einige der großen Provinzen in China damit, Emissionshandelssysteme und damit einen Preis für CO₂-Emissionen einzuführen. Das australische System operiert zunächst ab Juli 2012 mit einem Fixpreis von 18 Euro pro Tonne CO₂ (im Januar 2012 lag der Preis für eine Tonne CO₂ im EU-Emissionshandelssystem [EU ETS] bei 7 Euro). Die Einführung eines US-weiten Emissionshandelssystems ist zwar im Jahr 2009 am Widerstand der fossilen und energieintensiven Industrien unter Verweis auf die Kosten des Klimaschutzes gescheitert und gilt angesichts der innenpolitischen Lage der USA auf Jahre hinaus als nicht durchsetzbar. In Kalifornien aber – immerhin die achtgrößte Volkswirtschaft der Welt – soll ein Emissionshandelssystem im Januar 2013 starten. Dieses System würde sogar eine Verbesserung gegenüber dem Handelssystem der EU darstellen, weil hier neben dem Strom- und Industriesektor auch der Transport- und der Gebäudesektor berücksichtigt werden.

Zwar wird um die Einführung dieser Systeme in den einzelnen Regionen noch gerungen: Insbesondere die fossilen Energieindustrien versuchen, die Einführung der CO₂-Bepreisung zu verhindern oder doch wenigstens eine großzügige Ausstattung mit kostenlosen und wertvollen Zertifikaten zu erreichen. Der Preis dieser Zertifikate wird aber nach ökonomischer Theorie und den Erfahrungen im EU-System wie alle anderen Produktsteuern ohnehin an die Konsumenten weitergegeben. Die Frage der freien Zuteilung dieser Klimarente an Unternehmen oder die Versteigerung zur Aufbesserung der öffentlichen Kasse ist im Kern ein Verteilungskonflikt zwischen Unternehmen und der Gemeinschaft in Form des Staatshaushaltes.

Gespräche über eine Verknüpfung dieser entstehenden Emissionshandelssysteme miteinander und dem EU-System haben bereits begonnen. Der Vorteil solcher Verknüpfungen sind geringere Klimaschutzkosten durch eine effiziente regionale Verteilung von Reduktionsmaßnahmen sowie die Möglichkeit der Kompensation der Klimaschutzkosten ärmerer Regionen durch den Verkauf von Emissionszertifikaten.

Solche erste Schritte eines polyzentrischen Politikansatzes mit Maßnahmen auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene können die Verhandlungen auf internationaler Ebene erleichtern, weil sie die Kosten der Emissionsvermeidung senken. Aber auch das Umge-

⁵ *UNEP* et. al. 2011, S. 12.



Abb. 10 Ungebrochenes Wachstum der Investitionen in Erneuerbare Energien in Asien. Jährliche Investitionen in Erneuerbare Energien 2004–2011 (nur Projekte > 1 Megawatt; werden kleinere Projekte berücksichtigt, kommen in Europa allein im Jahr 2010 etwa 34 Mrd. US\$ hinzu). (Quelle: UNEP et al. 2011, S. 19)

kehrte gilt: Die Klimapolitik auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene kann nur erfolgreich sein, wenn es am Ende zu einem globalen Abkommen kommt. Die Klimapolitik bedarf letztlich eines globalen ordnungspolitischen Rahmens, in dem die Nutzung der Atmosphäre einen Preis bekommt. Sonst können Emissionsreduktionen in einer Region immer zu Mehremissionen in anderen Ländern führen. Es wäre jedoch das Ende der Klimapolitik, wenn mit den guten Beispielen auf den Abschluss eines globalen Abkommens gewartet würde.

Die Klimapolitik muss zahlreiche Kooperations- und Verteilungsprobleme lösen. Selbst unter der Annahme rational-eigennütziger Akteure gibt es aber Anzeichen dafür, dass diese Probleme überwindbar sind. Eine langfristig nachhaltige Energieversorgung wird es nur geben können, wenn die Nationalstaaten bereit sind, miteinander zu kooperieren und dabei nicht nur die Interessen der heute Lebenden berücksichtigen, sondern auch derer, die heute noch nicht geboren sind und daher auf Märkten und bei Wahlen ihre Interessen noch nicht geltend machen können.

Literatur

- BARKER, T., BASHMAKOV, I., BERNSTEIN, L., BOGNER, J. E., BOSCH, P. R., DAVE, R., DAVIDSON, O. R., FISHER, B. S., GUPTA, S., HALSNÆS, K., HEIJ, G. J., KAHN RIBEIRO, S., KOBAYASHI, S., LEVINE, M. D., MARTINO, D. L., MASERA, O., METZ, B., MEYER, L. A., NABUURS, G.-J., NAJAM, A., NAKICENOVIC, N., ROGNER, H.-H., ROY, J., SATHAYE, J., SCHOCK, R., SHUKLA, P., SIMS, R. E. H., SMITH, P., TIRPAK, D. A., URGE-VORSATZ, D., and ZHOU, D.: Technical summary. In: METZ, B., DAVIDSON, O. R., BOSCH, P. R., DAVE, R., and MEYER L. A. (Eds.): *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press 2007
- Climateactiontracker.org*: climateactiontracker.org (2011) (Zugriffsdatum 1. Dezember 2011)
- CRUTZEN, P.: Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma? *Climatic Change* 77, 211–219 (2006)
- EDENHOFER, O., and FLACHSLAND, C.: Transforming the global energy system – Pathways towards a sustainable energy supply. In: DEBIEL, T., HIPPLER J., ROTH, M., and ULBERT, C. (Eds.): *Global Trends 2013, Peace – Development – Environment*. Bonn: Stiftung Entwicklung und Frieden (SEF) 2012
- EDENHOFER, O., FLACHSLAND C., und BRUNNER S.: Wer besitzt die Atmosphäre? Zur politischen Ökonomie des Klimawandels. *Leviathan* 39/2, 201–221 (2011)
- EDENHOFER, O., KNOPE, B., BARKER, T., BAUMSTARK, L., BELLEVRAT, E., CHATEAU, B., CRIQUI, P., ISAAC, M., KITOUS, A., KYPREOS, S., LEIMBACH, M., LESSMANN, K., MAGNÉ, B., SCRIECIU, S., TURTON, H., and VAN VUUREN, D. P.: The economics of low stabilization: model comparison of mitigation strategies and costs. *Energy J.* 31/1, 11–48 (2010a)
- EDENHOFER, O., LOTZE-CAMPEN, H., WALLACHER, J., und REDER, M. (Eds.): *Global, aber gerecht: Klimawandel bekämpfen, Entwicklung ermöglichen*. München: Beck 2010b
- EDENHOFER, O., and SEYBOTH, K.: Intergovernmental Panel on Climate Change. In: SHOGREN, J. F. (Ed.): *Encyclopedia of Energy. Natural Resource and Environmental Economics*. San Diego: Elsevier 2013 (submitted)
- EU JRC* (Joint Research Centre) und *PBL* (Netherlands Environmental Assessment Agency): Steep increase in global CO₂ emissions despite reductions by industrialised countries. 2011
<http://www.pbl.nl/en/news/pressreleases/2011/steep-increase-in-global-co2-emissions-despite-reductions-by-industrialised-countries> (Zugriff am 1. Dezember 2011)
- FELD, L., KONRAD, K., und THUM, M.: Umdenken in der Klimapolitik nach dem Klimagipfel von Cancún! *Ifo Schnelldienst* 5, 811 (2011)

- HEITZIG, J., LESSMANN, K., and ZOU, Y.: Self-enforcing strategies to deter free-riding in the climate change mitigation game and other repeated public good games. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108/38, 15739–15744 (2011)
- High-Level Advisory Group*: Report of the Secretary-General's High-level Advisory Group on Climate Change Financing. 5 November 2010.
<http://www.un.org/wcm/content/site/climatechange/pages/financeadvisorygroup> (Zugriff am 1. Dezember 2011)
- HOUSE, K. Z., BACLIG, A. X., RANJAN, M., VAN NIEROP, E. A., WILCOX, J., and HERZOG, H. J.: Economic and energetic analysis of capturing CO₂ from ambient air. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 108/51, 20428–20433 (2011)
- IEA: World Energy Statistics. CD-ROM. Paris: IEA Energy Statistics Division 2011a
- IEA: CO₂ Emissions from Fuel Combustion. 2011 edition, CD-ROM. Paris: IEA 2011b
- IEA: World Energy Outlook 2011, Presentation to the Press, London 9 November 2011. (2011c)
Im Internet <http://www.iea.org/weo> (Zugriff 10. Januar 2012)
- IPCC: Summary for policymakers. In: EDENHOFER, O., PICHs-MADRUGA, R., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., MATSCHOSS, P., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLOMER, S., and STECHOW, C. VON (Eds.): IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press 2011
- JAEGER, C. C., and JAEGER, J.: Three views of two degrees. *Climate Change Economics* 1/3, 145–166 (2010)
- JAKOB, M., STECKEL, J., FLACHSLAND, C., and BAUMSTARK, L.: Climate Finance for Developing Countries: Blessing or Curse? Working Paper (2012)
- KALKUHL, M., EDENHOFER, O., and LESSMANN, K.: Learning or lock-in: Optimal technology policies to support mitigation. *Resource and Energy Economics* 34/1, 1–23 (2012)
- LEIMBACH, M., BAUER, N., BAUMSTARK, L., LUEKEN, M., and EDENHOFER, O.: Technological change and international trade – Insights from REMIND-R. *Energy J.* 31/1, 109–136 (2010)
- LENTON, T. M., HELD, H., KRIEGLER, E., HALL, J. W., LUCHT, W., RAHMSTORF, S., and SCHELLNHUBER, H. J.: Tipping elements in the Earth's climate system. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105, 1786–1793 (2008)
- LESSMANN, K., and EDENHOFER O.: Research cooperation and international standards in a model of coalition stability. *Resource and Energy Economics* 33/1, 36–54 (2011)
- LESSMANN, K., MARSCHINSKI, R., and EDENHOFER, O.: The effects of tariffs on coalition formation in a dynamic global warming game. *Economic Modelling* 26/3, 641–649 (2009)
- MEINSHAUSEN, M., MEINSHAUSEN, N., HARE, W., RAPER, S., FRIELER, K., KNUTTI, R., FRAME, D., and ALLEN, M.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. *Nature* 458, 1158–1163 (2009)
- MESSNER, D., und RAHMSTORF S.: Kipp-Punkte im Erdsystem und ihre Auswirkungen auf Weltpolitik und Wirtschaft. In: DEBIEL, T., MESSNER, D., NUSCHELER, F., ROTH, M., and ULBERT, C. (Eds.): *Globale Trends 2010*. S. 261–280. Bonn: Stiftung Entwicklung und Frieden 2010
- MOOMAW, W., YAMBA, F., KAMIMOTO, M., MAURICE, L., NYBOER, J., URAMA, K., and WEIR, T.: Introduction. In: EDENHOFER, O., PICHs-MADRUGA, R., SOKONA, Y., SEYBOTH, K., MATSCHOSS, P., KADNER, S., ZWICKEL, T., EICKEMEIER, P., HANSEN, G., SCHLOMER, S., and STECHOW, C. VON (Eds.): IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press 2011
- OSTROM, E., GARDNER, R., and WALKER, J.: *Rules, Games, and Common Pool Resources*. Ann Arbor: University of Michigan Press 1994
- REN21: *Renewables 2011 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat 2011
- Royal Society: *Geo-engineering the climate: science, governance and uncertainty*. (2009)
- UNEP, Frankfurt School of Finance, Bloomberg Energy Finance: *Global Trends in Renewable Investment 2011*. UNEP 2011
- UN: *World Population Prospects: The 2008 Revision*. UN 2009
- VICTOR, D.: *Global Warming Gridlock: Creating More Effective Strategies for Protecting the Planet*. Cambridge, UK, New York, NY, USA: Cambridge University Press 2011
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen): *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*. Berlin: WBGU 2006
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen): *Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz*. Berlin: WBGU 2009
- WEITZMAN, M.: On modelling and interpreting the economics of catastrophic climate change. *The Review of Economics and Statistics* 91/1, 1–19 (2009)

World Resources Institute: Climate Analysis Indicators Tool (CAIT) Version 9.0. Washington, DC: World Resources Institute 2012

Internet: <http://cait.wri.org>. (Zugriff am 10. Februar 2012)

Prof. Dr. Ottmar EDENHOFER
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Postfach 601203
14412 Potsdam
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 331 2882565
Fax: +49 331 2882570
E-Mail: ottmar.edenhofer@pik-potsdam.de
Internet: www.pik-potsdam.de/members/edenh

Mercator Research Institute on
Global Commons and Climate Change (MCC)
Torgauer Straße 12–15
10829 Berlin

Technische Universität Berlin
Straße des 17. Juni 145
10623 Berlin

Dr. Christian FLACHSLAND
Mercator Research Institute on
Global Commons and Climate Change (MCC)
Torgauer Straße 12–15
10829 Berlin
Bundesrepublik Deutschland

Solarthermische Kraftwerke in Europa, dem Nahen Osten und Nordafrika: Ausschöpfung des Potenzials¹

Robert PITZ-PAAL (Köln)

Mit 4 Abbildungen und 1 Tabelle



¹ Ein ähnlicher Beitrag in englischer Sprache wurde vom *Journal of Energy and Power Engineering* (ISSN 1934–8975), USA zur Veröffentlichung angenommen.

Zusammenfassung

Solarthermische Kraftwerke (CSP – *Concentrated Solar Power*) verwenden die Energie der Sonne zur Stromproduktion und sind kommerziell verfügbar. Sie ermöglichen die Nutzung der immensen solaren Ressourcen im südlichen Europa, dem Nahen Osten, Nord-Afrika (MENA-Region) und anderswo. In dieser Veröffentlichung werden die Ergebnisse einer Studie des wissenschaftlichen Beirats der Vereinigung europäischer Akademien EASAC (*European Academies Science Advisory Council*) zusammengefasst, in welcher der aktuelle Stand und die Herausforderungen von CSP untersucht wurden und der potenzielle Beitrag von CSP in Europa und der MENA-Region bis 2050 analysiert wurde. In diesem Bericht werden die von Wissenschaftlern, Ingenieuren, Politikern, Unternehmen und Investoren gleichermaßen erforderlichen Handlungen aufgezeigt, die benötigt werden, um ein nachhaltiges Energiesystem mit großem Anteil von CSP zu schaffen und somit die solaren Ressourcen zu nutzen. Das Ergebnis der Studie ist, dass eine Kostensenkung des CSP-Stroms von 50–60% in den nächsten 10 bis 15 Jahren realistisch erscheint. Das würde die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Strom aus fossiler Stromerzeugung zwischen den Jahren 2020 und 2030 ermöglichen. Der Einbau von Speichern liefert einen Mehrwert, da solarthermische Kraftwerke mit Speichern flexible Leistung bereitstellen können. In Europa und den MENA-Ländern werden jedoch Anreizsysteme benötigt, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erreichen. Solche Systeme sollten den wahren Wert des Stroms im Verbundnetz widerspiegeln, effizient Forschung und Entwicklung fördern sowie Transparenz für Leistungs- und Kostendaten schaffen.

Abstract

Concentrating solar power (CSP) is a commercially available renewable energy technology capable of harnessing the immense solar resource in Southern Europe, the Middle East and North Africa (the MENA region), and elsewhere. This paper summarizes the findings of a study by the European Academies Science Advisory Council (EASAC) which has examined the current status and development challenges of CSP, and consequently has evaluated the potential contribution of CSP in Europe and the MENA region to 2050. It identifies the actions that will be required by scientists, engineers, policy makers, politicians, business and investors alike, to enable this vast solar resource to make a major contribution to establishing a sustainable energy system. The study concludes that cost reductions of 50–60% in CSP electricity may reasonably be expected in the next 10–15 years, enabling the technology to be cost competitive with fossil-fired power generation at some point between 2020 and 2030. Incorporation of storage delivers added value in enabling CSP to deliver dispatchable power. Incentive schemes will be needed in Europe and MENA countries to enable this point to be achieved. Such schemes should reflect the true value of electricity to the grid, effectively drive R&D, and ensure transparency of performance and cost data.

1. Einleitung

Solarthermische Kraftwerke (*Concentrated Solar Power*, CSP) sind kommerziell verfügbar und neben der photovoltaischen Stromerzeugung fähig, die immensen solaren Ressourcen im südlichen Europa, dem Nahen Osten, Nord-Afrika (MENA-Region) und anderswo zu nutzen. In solarthermischen Kraftwerken wird eine Hochtemperaturwärmequelle, durch die Konzentration von Solarstrahlung, zur Stromerzeugung in einem thermodynamischen Kreisprozess geschaffen.

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse einer Studie des wissenschaftlichen Beirats der Vereinigung europäischer Akademien EASAC (*European Academies Science Advisory Council*)² zusammen, die den aktuellen Stand und die Herausforderungen der Entwicklung von CSP untersucht und folglich den potenziellen Beitrag der CSP in Europa und der MENA-Region um 2050 auswertet (EASAC 2011). In diesem Bericht werden die von Wissenschaftlern, Ingenieuren, Politikern, Unternehmen und Investoren gleichermaßen erforderlichen Handlungen identifiziert, die benötigt werden, um ein nachhaltiges Energiesystem mit großem CSP-Anteil zu schaffen und somit die enormen solaren Ressourcen zu nutzen.

Solarthermische Kraftwerke wurden ursprünglich in den 1970er und 1980er Jahren entwickelt und hatten frühen kommerziellen Erfolg in den Vereinigten Staaten (PITZ-PAAL 2007). Es kam zu einer 20-jährigen Pause bis zur kommerziellen Renaissance in Spanien nach der Jahrhundertwende (ARINGHOFF et al. 2002). Während dieser Übergangszeit wurden die amerikanischen Kraftwerke zuverlässig weiter betrieben. Rasante technologische

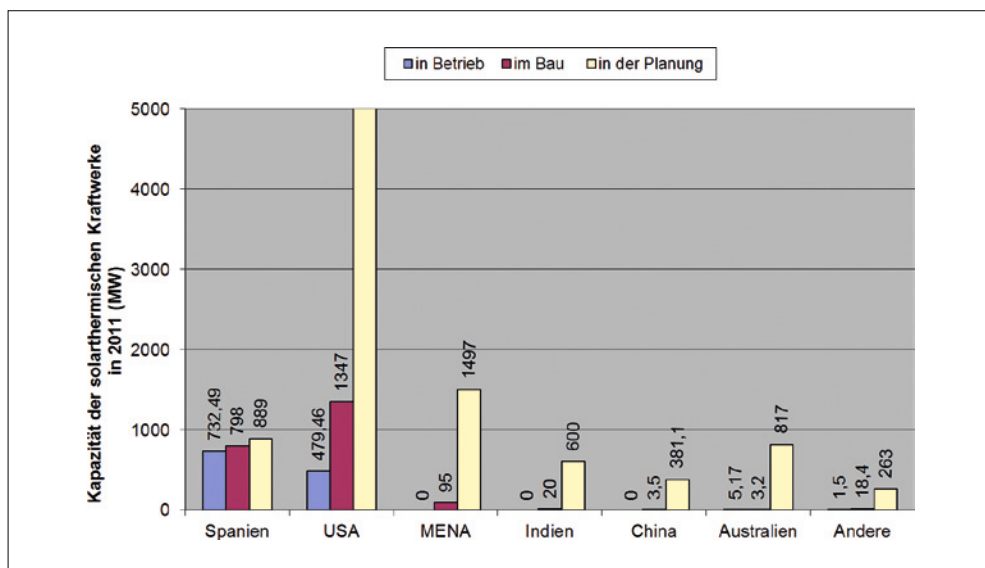


Abb. 1 Weltweite Verteilung von solarthermischen Kraftwerken, die sich im Betrieb, Bau oder Planung befinden.

² 2001 von den nationalen Akademien der EU-Mitgliedsstaaten gegründet, um die europäischen Entscheidungsträger der Wissenschaft in wichtigen EU-Fragen zu beraten: www.easac.eu.

Innovationen folgten, was zur Weiterentwicklung von CSP-Komponenten und der Entwicklung sowie Kommerzialisierung von neuen CSP-Technologien führte (MANCINI und HELLER 2003, MÜLLER-STEINHAGEN und TRIEB 2004, PITZ-PAAL et al. 2005a, b, PITZ-PAAL 2008, PRICE und KEARNEY 2005, ROMERO et al. 2002). Ein bedeutender Schritt ist die Entwicklung des DESERTEC-Konzeptes³ (TRIEB et al. 2005, 2006) zur übergreifenden Förderung von technischer, kommerzieller und politischer Zusammenarbeit von Industrie- und Entwicklungsländern zur Nutzung des solaren Potenzials der weltweiten Wüsten zum allseitigen Vorteil.

Im Jahr 2011, wie in Abbildung 1 dargestellt, gab es eine weltweit installierte CSP-Leistung von 1,3 GW; 2,3 GW befanden sich im Bau, und 31,7 GW waren geplant.⁴ Spanien ist bis heute der führende Vertreter der CSP in Europa.

2. Gegenwärtiger Stand und technologische Entwicklungen

Ein solarthermisches Kraftwerk besteht, wie in Abbildung 2 schematisch dargestellt, aus vier Teilsystemen: Konzentratorsystem, Solar-Receiver, Speicher und/oder Zusatzfeuerung (beschriftet mit „Back-up-System“ in der Abbildung) und dem Kraftwerksblock. Diese sind durch Übertragung von Strahlung oder durch Fluidtransport miteinander verknüpft.

Eine wichtige inhärente Option von solarthermischen Kraftwerken ist die Integration eines Wärmespeichers, wodurch auch Strom erzeugt werden kann, wenn keine Sonne scheint. Dies trägt zum Alleinstellungsmerkmal von CSP (im Vergleich zu vielen anderen

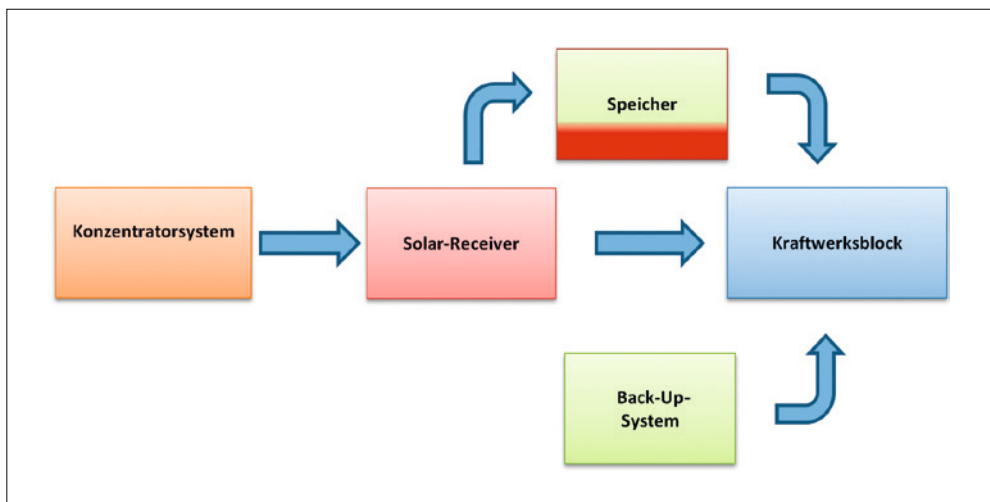


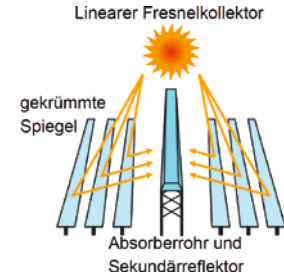
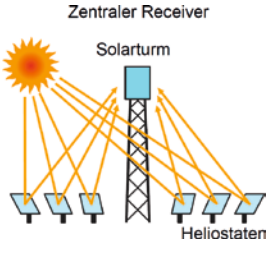
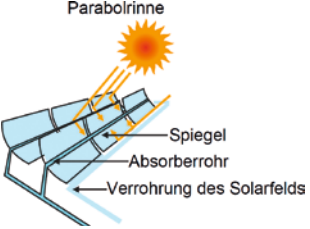
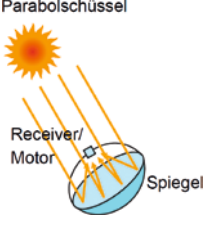
Abb. 2 Komponenten eines solarthermischen Kraftwerks mit Speicher

3 Das DESERTEC-Konzept propagiert, bis 2050 ein gemeinsames Europäisch-Nordafrikanisches Stromnetz zu errichten, da die Versorgung der Region mit erneuerbarem Strom dadurch voraussichtlich kostengünstiger wird und weitere sozioökonomische Vorteile im Vergleich zu einer nicht verbundenen Versorgung entstehen.

4 Abgeleitet von *California Energy Commission* 2010, *CSP Today* 2011, *Greentechmedia* 2011, *Protermosolar* 2011, *US Bureau of Land Management* 2011.

erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien), Strom nach Bedarf zur Verfügung zu stellen, bei. Solarthermische Kraftwerke können prinzipiell in vier Kategorien eingeteilt werden, die je nach der Art, wie die Solarstrahlung gebündelt wird, und der Receivertechnologie klassifiziert werden (vgl. Tab. 1).

Tab. 1 Die vier wichtigsten CSP-Kategorien (GEYER und MANCINI 2006)

Fokus-Typ	Linienfokus	Punktfokus
Receiver		
Feststehend Der Receiver bleibt stationär und mechanisch unabhängig vom Konzentratorsystem. Die erreichbare Betriebstemperatur hängt vom Konzentrationsverhältnis ab.	<p>Linearer Fresnelkollektor</p> 	<p>Zentraler Receiver</p> 
Nachgeführt Der Receiver bewegt sich zusammen mit dem Konzentratorsystem. Mobile Receiver sammeln mehr Strahlungsenergie als entsprechende stationäre Receiver.	<p>Parabolrinne</p> 	<p>Parabolschüssel</p> 

Die Stromgestehungskosten von CSP sind derzeit vergleichbar denen der *Offshore*-Windenergie, etwas höher als bei Photovoltaik (PV) und etwa doppelt so hoch wie die von Kohlekraftwerken im mittleren Leistungsbereich (ohne *Carbon Capture and Storage*) und von *Onshore*-Windenergie (EASAC 2011). In Studien wurde wiederholt auf das Potenzial von CSP hingewiesen, die Stromgestehungskosten um rund 60% zu reduzieren (PITZ-PAAL et al. 2005a, b). Dies soll zur einen Hälfte durch *Scale-up* sowie Serienfertigung und zur anderen Hälfte durch technologische Innovationen erreicht werden.

Horizontale technologische Verbesserungen werden erwartet, deren Nutzen möglicherweise über die einzelnen CSP-Kategorien hinausgeht. Für Spiegel umfassen die Verbesserungen eine Erhöhung des Reflexionsvermögens auf 95% (mittels Entwicklung eines dünneren Spiegelglases, durch schmutzabweisende und hydrophobe Beschichtungen auf der Glasoberfläche zur Vermeidung von Staubablagerungen sowie Verringerung des Reinigungsaufwandes sowie aluminisierte Oberflächenspiegel und Polymerreflektoren). Im Bereich der Wärmeträgerflüssigkeiten, Speichermedien und thermodynamischen Zyklen werden übergreifende technologische Durchbrüche erwartet:

- *Wärmeträgerfluide*: überhitzter Dampf, neuartige Salzschnmelzen (mit niedriger Schmelztemperatur und höheren Betriebstemperaturen), Nano-Fluide, Druckluft (hauptsächlich Entwicklung neuer Solarreceiver) und zirkulierende Partikel.

- *Speicherung*: Phasenübergangsmaterialien (*Phase Change Materials*) zur direkten Dampferzeugung, Hochtemperaturspeicher für Gasturbinenprozesse, kompakte Wärmespeicher (chemische Reaktionen) und Wärmeübertragungskonzepte.
- *Thermodynamische Prozesse*: überkritischer Wasserdampf oder Kohlendioxid-basierte Prozesse, Luft-Brayton-Kreisprozesse und kombinierte Kreisprozesse (für Turmtechnologie).

Um diese technologischen Durchbrüche und die damit verbundenen Kosten und Effizienzsteigerungen zu realisieren, ist es essenziell, die verschiedenen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsbemühungen mit einem Marktanreizsystem zu koordinieren. Dieses System sollte eine Kostensenkung durch Innovation, gegenüber einer Kostenreduktion durch Massenproduktion auf dem aktuellen Stand der Technik, bevorzugen. Ohne die Möglichkeit, eine Technologie über ein paar Technologiegenerationen in den Markt einzuführen, zu verbessern und anzupassen, ist die Forschung in einem hart umkämpften Markt sehr risikoreich.

Aufgestockte Forschungsmittel, eine stärkere Integration von Grundlagen- und angewandter Forschung, gemeinsam mit Demonstrationsprogrammen und Marktanreizen, sind zur Beschleunigung der Innovationszyklen erforderlich. Grundlagenforschung an neuen Materialien, Wärmeträgern und Beschichtungen ist notwendig, und integrierte Programme sollten den reibungslosen Übergang vielversprechender Technologien von Prototypsystemen im Labormaßstab zu Pilotanlagen und Demonstrationseinheiten ermöglichen. Ergebnisse der einzelnen Phasen sollten, in Hinblick auf Auswirkungen auf die Systemkostenziele, vor dem Beginn der nächsten Phase, unabhängig ausgewertet und bewertet werden.

3. Das Erreichen von wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit

Ein alternativer Ansatz zur Abschätzung des zukünftigen Potenzials zur Kostensenkung ist die Verwendung der etablierten Lernkurveneffekte. Diese basieren auf der Beobachtung, dass sich die Kosten von Technologien im Allgemeinen durch einen charakteristischen Prozentsatz für jede Verdopplung der installierten Leistung reduzieren. (Die Lernrate ist daher definiert als die prozentuale Reduktion der Kosten für jede Verdopplung der installierten Leistung.) Abbildung 3 zeigt die kumulierte CSP-Leistung, die installiert werden muss, um eine 50%ige Reduktion der Stromgestehungskosten, für Lernraten von 10 und 20%, was den typischen Bereich für Erneuerbare-Energien-Technologien abdeckt, zu erreichen. Unter der Annahme, dass eine etwa 50%ige Kostensenkung notwendig ist, um Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Strom aus fossiler Stromerzeugung zu erreichen (zu gegenwärtigen Preisen für fossile Brennstoffe und ohne *Carbon Capture and Storage*⁵), müssen ca. 9 GW CSP-Leistung installiert werden, falls die Lernrate 20% beträgt, und 100 GW, falls sie 10% beträgt.

Abbildung 4 zeigt die möglichen Folgen einer Lernrate von 15% (in der Mitte des obigen Bereiches und in der Nähe der Schätzung von 14%, TRIEB 2004) auf den Punkt, wo eine 50%ige Kostenreduktion von CSP-Strom erreicht werden könnte, ausgehend von einer aktuellen CSP-Installationsrate von rund 500 MW pro Jahr. Unter der Annahme eines

⁵ Unter „Carbon Capture and Storage“ versteht man die Abtrennung von klimaschädlichem CO₂ aus den Verbrennungsgasen fossiler Kraftwerke und deren langfristige unterirdische Speicherung. Dadurch können Klimagasemissionen reduziert werden.

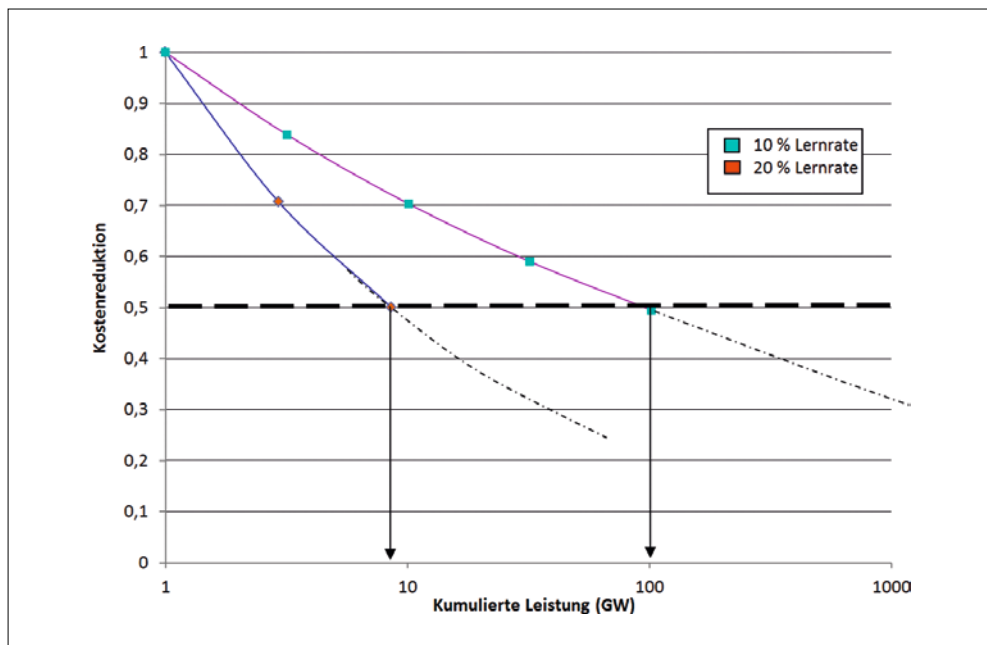


Abb. 3 Relative Kosten der CSP-Technologie als Funktion der kumulierten installierten Leistung für eine Lernrate von 10 und 20%.



Abb. 4 Entwicklung der LCoE-Kosten (*Lifetime Cost of Electricity*) über Zeit für solarthermische Kraftwerke, die bei 15% (niedrig) und 30% (hoch) Wachstumsraten pro Jahr installiert wurden (basierend auf einer Lernrate von 15%).

Wachstums der CSP-Installationsrate von 15 % (niedrig) und 30 % (hoch) pro Jahr wird eine 50%ige Kostenreduzierung von CSP-Strom in den 2020er Jahren erreicht. Zu diesem Zeitpunkt wird CSP wettbewerbsfähig gegenüber anderen Energieerzeugungsformen sein.

Die Lern- und die Wachstumsrate der installierten CSP-Leistung sind entscheidende Faktoren für den Zeitpunkt, wann CSP wettbewerbsfähig gegenüber anderen Technologien sein wird, und für die Frage, welche kumulative Förderung erforderlich ist, um diesen Punkt zu erreichen. Der ausgesuchte Zahlenbereich in dieser Analyse basiert auf Expertenschätzungen und Meinungen und wurde nicht mit tatsächlichen Daten verifiziert, da diese nicht vorhanden sind. Damit Schätzungen der Lernrate verfeinert werden können, wird daher dringend empfohlen, Kontrollmechanismen einzuführen, die transparente Installationskosten sowie Installationsraten der CSP-Technologie durchsetzen.

Der **Wert** und nicht nur die **Kosten** der solarthermischen Stromerzeugung bestimmen die **wirtschaftliche** Wettbewerbsfähigkeit. Der Wert setzt sich aus folgenden drei Komponenten zusammen:

- dem Wert pro kWh der durch das Kraftwerk erzeugten **elektrischen Energie**, der mit der Zeit an einem umkämpften Strommarkt entsprechend der Verfügbarkeit und des Preises anderer Stromquellen variiert;
- dem Beitrag, den solarthermische Kraftwerke durch Gewährleistung von **Erzeugungskapazitäten**, um die Stromnachfrage zu Spitzenzeiten zu decken, leisten;
- den „**Dienstleistungen**“ des Kraftwerks, die dem Stromnetzbetreiber helfen, Angebot und Nachfrage kurzfristig anzugleichen (in der Regel auf Zeitskalen von Sekunden und Minuten).

Potenziell kann der Einbau von thermischen Speichern in solarthermische Kraftwerke für alle diese drei Komponenten von Vorteil sein. In Bezug auf die **erste Komponente** haben Systemsimulationen in Verbindung mit der Studie von NAGL et al. (2004) gezeigt, dass in einem Energiesystem mit einem steigenden solaren Anteil zunehmend Wert durch Verlagerung der Stromerzeugung zu den sonnenlosen Abendstunden erzeugt werden kann. Das stellt einen Anreiz für solarthermische Kraftwerke mit thermischen Speichern dar. Die Verfügbarkeit solcher Kraftwerke im System bedeutet, dass insgesamt ein größerer Anteil durch Solarstrom abgedeckt werden kann, und ist ein wichtiger Punkt, der über die reinen Erzeugungskosten hinaus bei der Bestimmung der optimalen Mischung von CSP und PV zu berücksichtigen ist.

Durch die Bereitstellung von Erzeugungskapazitäten zur Spitzenlastabdeckung (**zweite Komponente** des Wertes) können solarthermische Kraftwerke mit Speicher zur Deckung von Spitzenlasten beitragen und Reservekapazitäten zu variablen erneuerbaren Quellen bereitstellen.

Die Deckung von Spitzenlasten kann durch den Einbau einer Zusatzfeuerung in das Kraftwerk vergrößert werden. Die Effizienz einer solchen Zusatzfeuerung für fossile Brennstoffe dürfte jedoch wesentlich geringer sein als die eines Gas-und-Dampf-Kombikraftwerks.

Der Wert der Bereitstellung von Leistung, um die Spitzenlast des Systems abzudecken, hängt von dem System selbst ab, so dass dessen Quantifizierung in Abhängigkeit von Systemmodellen erfolgen muss.

Der Wert der thermischen Energiespeicherung, der es dem Kraftwerk ermöglicht, *Netzdienstleistungen*⁶ zu liefern, ist die **dritte Komponente**. Solarthermische Kraftwerke mit Speicher können rotierende Reserven bereitstellen, da sie in der Lage sind, bei Teillast in weniger als 30 min die Produktion ansteigen zu lassen, indem sie auf die gespeicherte Wärme zurückgreifen (die „Rampe“ ist durch die thermische Trägheit der Geräte begrenzt). Das Herunterfahren ist schneller und erfolgt auf Zeitskalen von rund 15 min mittels Umleitung der Wärme zum Speicher. Dies wird in Spanien verwendet, um – auf Anfrage – 30%ige Leistungsrampen in weniger als einer Stunde zu liefern, so dass das Kraftwerk durch den Netzbetreiber REE als *dispatchable* angesehen werden kann.

Bei der Erörterung der Dienstleistungen, die von einem solarthermischen Kraftwerk geliefert werden und dem Netzbetreiber dabei helfen, kurzfristige Angebots- und Nachfrageschwankungen auszugleichen, muss auch der potenziell „negative Wert“, welcher durch Transienten an teilweise bewölkten Tagen verursacht wird, berücksichtigt werden. Der Einbau eines Speichers mit einer Kapazität von mindestens 3 h in das solarthermische Kraftwerk ermöglicht die Nutzung der erheblichen thermischen Trägheit des Speichermediums, um jegliche resultierende Dampftemperatur-/Druckgradienten an solchen Tagen am Eingang des *Power Blocks* zu dämpfen.

Der Einbau von thermischen Speichern in solarthermische Kraftwerke führt zu einem signifikanten Mehrwert im Vergleich zu PV-Anlagen oder solarthermischen Kraftwerken ohne Speicher. Dies bedeutet, dass solarthermische Kraftwerke die meisten *Dispatchability*-Merkmale eines fossil-befeuerten Kraftwerks im mittleren Leistungsbereich erfüllen.

4. Perspektiven bis 2050

In Anbetracht des Potenzials von CSP in Europa bis 2050 ist das EU-Ziel der Reduzierung der Treibhausgasemissionen um 80–95 % bis 2050 ein wichtiger Parameter. Erneut durch den Europäischen Rat im Februar 2011 bestätigt, erfordert dieses Ziel im Wesentlichen eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen des EU-Stromsystems auf nahezu Null bis zum Jahre 2050 (*Europäische Kommission* 2011a).

Der Energiemix im Jahr 2050 kann Kernkraftkraftwerke sowie fossile Kraftwerke mit *Carbon Capture and Storage* beinhalten. Jedoch haben einige Länder, wie auch Deutschland, die Kernkraftwerke aufgrund der durch den Unfall in Fukushima in Japan ausgelösten Besorgnis der Öffentlichkeit aus ihrer Betrachtung ausgeschlossen. *Carbon Capture and Storage* von fossilen Kraftwerken ist im Wesentlichen kommerziell unerprobt. Weiterhin ist noch nicht geklärt, ob genügend sichere Lagerstätten, im Einvernehmen mit der Öffentlichkeit und den Behörden, gefunden werden können. Das Konzept festigt daher die Abhängigkeit Europas von der Preissteigerung und Preisvolatilität importierter fossiler Brennstoffe.

Variable erneuerbare Quellen, wie Wind, Photovoltaik und Meeresenergie, werden 2050 eine wichtige Rolle in Europas Stromversorgung spielen, aber ihre Variabilität wird auch neue Herausforderungen für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage schaffen. Ein europäisches Verbundnetz, ein europäischer Markt und ein Nachfragemanagement können

⁶ Darunter versteht man die Anpassung der elektrischen Real- und Blindleistung eines Kraftwerks, um eine stabile Netzspannung und Netzfrequenz zu gewährleisten.

gemeinsam zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen. Zusätzliche Speicherkapazität im Stromnetz könnte jedoch erforderlich sein, und kontrollierbare erneuerbare Energien werden einen hohen Stellenwert besitzen. Solche Quellen umfassen Wasserkraft, Geothermie – in beiden Fällen sind jedoch die natürlichen Ressourcen in Europa begrenzt – und CSP mit Speicher, deren natürlichen Ressourcen bei weitem die erwartete Stromnachfrage übersteigen, wenn man auch die benachbarte MENA-Region berücksichtigt.

Viele Prognosen sagen nur ein geringfügiges bzw. sogar kein Wachstum des europäischen Strombedarfs bis 2050 voraus. In der MENA-Region wird jedoch aufgrund von Bevölkerungswachstum und wirtschaftlicher Entwicklung ein rascher Anstieg der Stromnachfrage, möglicherweise sogar bis zu einem europäischen Gesamtniveau, bis 2050 vorausgesagt (z. B. DLR 2005). Internationale Initiativen zur Begrenzung der globalen Erwärmung betonen, dass eine solche Entwicklung auf einem nachhaltigen Weg, mit dem Fokus auf der Maximierung der Verwendung der lokalen erneuerbaren Energiequellen, erfolgen sollte. Die Solarenergie ist selbstverständlich die vorherrschende erneuerbare Energiequelle in der MENA-Region. Da die erneuerbare Energieerzeugung derzeit deutlich teurer als die fossilen Alternativen ist, wird aufgrund der wirtschaftlichen Ausgangssituation der MENA-Länder ausländische Hilfe für einen solchen kohlenstoffemissionsarmen Weg benötigt.

Es ist nicht ein Mangel an Sonnenschein in Südeuropa und der MENA-Region, der den Beitrag solarthermischer Kraftwerke einschränken wird, sondern es sind andere Faktoren, insbesondere:

- **Stromgestehungskosten** von CSP im Verhältnis zu alternativen Technologien, der **Wert** der CO₂-Minderung und der Stromerzeugung mittels CSP;
- **physikalische Einschränkungen** der Installation von CSP-Leistung aufgrund von Verfügbarkeit von Land, Wasser, Produktionskapazitäten, Fachkräften usw.;
- Physikalische und betriebliche Einschränkungen der **Übertragung** von Strom durch ganz Europa und die MENA-Region zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage;
- Überlegungen über **Versorgungssicherheit**, insbesondere die vergleichweisen Schwachstellen, die verschiedenen Energieträgern inhärent sind, wenn diese importiert werden.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde auf die Abhängigkeit der Stromgestehungskosten von der Lernrate und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die kumulativ erforderlichen Subventionen zum Erreichen von wirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit eingegangen. Ein Beispiel kann das verdeutlichen: Wenn heute 60% der CSP-Kapitalkosten subventioniert werden müssen (einfachheitshalber angenommen als Zuschuss), aber nur 10% Subventionen benötigt würden, sobald die Stromgestehungskosten von CSP halbiert worden wären, dann ist die kumulativ benötigte Förderung, um eine Kostenhalbierung zu erreichen, 6,5 Milliarden Euro für eine Lernrate von 20% (entspricht einer installierten Leistung von 9 GW) und 61 Milliarden Euro, wenn sie nur 10% (entspricht einer installierten Leistung von 100 GW) beträgt. Nach neuesten Schätzungen der Gesamtkosten der Zahlungen mit Anreizwirkung, die benötigt werden, um Kostenparität zu erreichen, fallen die kumulierten Subventionen in folgenden Bereich: UMMEL et al. (2008) schätzen sie auf 20 Milliarden US-Dollar (entspricht 20 GW CSP), WILLIGES et al. (2010) auf 43 Milliarden Euro für ihr Basisszenario (entsprechend 157 GW CSP).

Hinsichtlich der **physikalischen Einschränkungen** muss vor allem die Verfügbarkeit von Wasser in Wüstenregionen für CSP beachtet werden. Eine Weiterentwicklung trockener Kühlsysteme ist notwendig, um die zugehörige Minderung der Stromerzeugungseffizienz zu reduzieren. Es existieren viele potenziell geeignete Flächen für solarthermische Kraftwerke, insbesondere in der MENA-Region, jedoch brauchen Grundstückserwerb, Baugenehmigungen usw. Zeit. Das könnte zu einem bestimmten Zeitpunkt die hohen Entwicklungsraten von CSP, insbesondere in Südeuropa, bremsen.

Um eine weitgehend kohlenstoffemissionsfreie Stromversorgung in Europa im Jahr 2050 zu erreichen, muss ein Großteil der bestehenden Erzeugungskapazitäten im Betrachtungszeitraum ausgetauscht werden. Ebenso wird der in der MENA-Region zu erwartende Ausbau der Stromversorgung große und anhaltende Investitionen in neue Erzeugungskapazitäten erfordern. Die für einen Ausbau von CSP erforderlichen Fertigungskapazitäten müssen in diesem Zusammenhang angemessen ausgebaut werden, zumal viele der Kraftwerkskomponenten, wie Turbinen, Wärmetauscher, Rohrleitungen usw., für viele der potenziellen Technologien verwendet werden. Erhebliche Steigerungen und Verschiebungen von Fertigungskapazitäten werden erforderlich sein, unabhängig davon, welcher Erzeugungsmix gewählt wird. Solarthermische Kraftwerke sind im Bau vor allem in gewöhnlichen Materialien wie Stahl, Glas und Beton materialintensiver als fossil befeuerte Kraftwerke. Die Verfügbarkeit dieser Materialien scheint jedoch mit Blick auf das Produktionsniveau in der allgemeinen Wirtschaft kein unüberwindliches Hindernis für die CSP-Expansion darzustellen. Ein nachhaltiges und schnelles Wachstum von CSP in Europa und der MENA-Region würde koordinierte Anstrengungen erfordern, um die damit verbundene Umverteilung und Umschulung von Mitarbeitern zu ermöglichen. Beachtenswert ist jedoch, dass in einem Zeitraum von fünf Jahren die Zahl der Beschäftigten in der Industrie der erneuerbaren Energien in Europa von 230 000 auf 550 000 gesteigert wurde.

Es wird allgemein angenommen, dass ein Hochspannungs-Gleichstrom-**Übertragungsnetz** (HGÜ) als „Rückgrat“ oder „Autobahn“ in Europa und der MENA-Region gebaut werden muss, um bestehende Hochspannungs-Wechselstrom (HVAC)-Übertragungs- und Verteilungsnetze zu erweitern. Moderne HGÜ-Leitungen können Übertragungsverluste über 3000 km auf rund 10% begrenzen. Übertragung von elektrischer Energie über solche Entfernungen ist mit HVAC-Leitungen, angesichts der Verluste, die eher im Bereich von 50% lägen, nicht praktikabel (DLR 2006). Darüber hinaus müssen das HVAC-Netz ausgebaut und weitgehend „Smart“-Grid-Technologien⁷ eingesetzt werden.

Die aktuellen Einschränkungen des europäischen Stromnetzes sind in der EU-Energiestrategie berücksichtigt, die als Ziel die Sicherung des Netzausbaus hat. Dieser Ausbau ist für das reibungslose Funktionieren des europäischen Strommarktes sowie die grenzüberschreitende Erzeugung und Übertragung von Strom – als Mechanismus zum Angleichen von Angebot und Nachfrage für erneuerbare Energiequellen aufgrund der geographischen Vielfalt (*Europäische Kommission* 2010a) – notwendig.

⁷ Der Begriff **intelligentes Stromnetz** (*smart grid*) umfasst die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischen Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung. Diese ermöglicht eine Optimierung und Überwachung der miteinander verbundenen Bestandteile. Ziel ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs.

Zunehmende **Energieversorgungssicherheit** ist ein zentrales Anliegen der EU-Energiepolitik. Eine Vergrößerung der CSP-Leistung in Südeuropa trägt zur Versorgungssicherheit bei, da sie die Notwendigkeit für Energieimporte (derzeit für über 50% des EU-Energieverbrauchs, vor allem für fossile Brennstoffe) reduziert. Die Frage nach der Versorgungssicherheit, die für nach Europa importierten CSP-Strom aus der MENA-Region auftritt, ist nicht eindeutig zu beantworten. Während einerseits eine Unterbrechung der Stromversorgung zu einem erheblichen Schaden – im Gegensatz zum kurzfristigen Ausbleiben von Importen an fossilen Brennstoffen und Uran – für die Importländer führen kann, stellt andererseits eine Unterbrechung der Stromversorgung auch für die Exportländer – im Gegensatz zur Situation beim Rohstoffexport – einen nicht wiederherstellbaren Verlust an Einnahmen dar, da Strom nicht gespeichert werden kann. Daher würde eine unsichere Versorgungssituation wahrscheinlich den exportierenden Ländern mehr schaden als die Unterbrechung der Stromversorgung Europa (IIASA 2009). Eine Diversifizierung der Versorgungsquellen und der Transportwege könnte helfen, die Risiken für Versorgungsunterbrechungen durch Terrorismus oder politische Störungen zu minimieren. Derzeit gibt es eine beträchtliche Reserve an Leistung auf fossiler Basis. Der Import von CSP-Strom würde die Importabhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringern. Die Importabhängigkeit stellt für Europa – aufgrund der Möglichkeit von Versorgungsunterbrechungen, der wirtschaftlichen Folgen von Preisschwankungen, der Preisvolatilität bzw. einer zukünftigen und nachhaltigen Preissteigerung sowie aufgrund des Fehlens weltweiter koordinierter Maßnahmen zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen – eine große Gefahr dar (Europäische Kommission 2011b). Die Integration der Energiemärkte zwischen Nachbarländern ist ein besonderes EU-Anliegen, das dazu beitragen sollte, die Risiken aus CSP-Importen zu mildern (Europäische Kommission 2010, 2011b).

5. Drei wesentliche Herausforderungen

Aufgrund der solaren Ressourcen in Südeuropa könnte CSP einen nützlichen Beitrag zur Erreichung des europäischen Ziels einer kohlenstofffreien Stromversorgung bis 2050 liefern. Die solaren Ressourcen in der MENA-Region sind sogar noch besser und weit größer. Schätzungsweise erreicht die solarthermische Stromerzeugung zwischen den Jahren 2020 und 2030 Kostenparität mit der fossil befeuerten Erzeugung (unter bestimmten Umständen möglicherweise früher). Zu diesem Zeitpunkt werden die solaren Ressourcen das Potenzial haben, die Elektrizitätserzeugung in Europa und der MENA-Region zu transformieren. **Drei Herausforderungen** müssen jedoch überwunden werden, wenn diese Transformation erreicht werden soll.

Die *erste Herausforderung* ist das Streben nach sowie das Erreichen der Kostenparität von CSP mit konventionellen Stromerzeugungsformen. Etwa die Hälfte der erwarteten Reduzierung der Stromgestehungskosten von CSP wird voraussichtlich von technologischen Innovationen und die andere Hälfte von *Scale-up* und Serienfertigung kommen. Die Studie hat die vielversprechendsten Bereiche der wissenschaftlichen und technologischen Entwicklung identifiziert, um Kostensenkungen zu realisieren (EASAC 2011). Gut gestaltete Anreizsysteme werden erforderlich sein, die den tatsächlichen, zeitlich variierenden Wert der Erzeugung widerspiegeln, so dass solarthermische Kraftwerke angemessen konzipiert sowie Forschung und Entwicklung effektiv gefördert werden. Entspre-

chende Mechanismen müssen sicherstellen, dass neue CSP-Technologie zügig aus dem Labor über Pilot- und Demonstrationsanlagen bis hin zur kommerziellen Anwendungen gebracht werden.

Anreizsysteme könnten auf bestimmte Technologien zugeschnitten sein (z. B. zwischen CSP und PV unterscheiden), oder sie könnten allgemeinere Unterstützung zur Steigerung der installierten Leistung von kohlenstoffarmen Technologien geben sowie auch technologiespezifische Forschungsförderung, Entwicklung und Demonstration unterstützen. In jedem Fall wird der Gesamtbetrag der benötigten Subventionen, um Kostenparität zu erreichen, entscheidend davon abhängen, wie schnell die Kosten mit zunehmender installierter Leistung reduziert werden können. Anreizsysteme sollten sicherstellen, dass Kostendaten zur Verfügung gestellt werden, so dass die Lernrate sowie deren zugrunde liegende Triebkräfte aufgebaut und überwacht und damit Energiestrategien und Anreizsysteme nach Bedarf angepasst werden können.

Die Integration von CSP und variablen erneuerbaren Stromquellen in das Verbundnetz spricht mittelfristig für eine weitere Unterstützung von CSP, die nicht nur auf die kurzfristige Erreichbarkeit der Wettbewerbsfähigkeit im Vergleich zu PV-Anlagen ausgerichtet werden sollte. CSP und PV könnten sich als ergänzende Technologien bei der Nutzung der solaren Ressourcen herausstellen, und es ist sinnvoll, beide Technologien in der heutigen Zeit weiter zu fördern.

Bei CSP-Technologien ist der Anteil der lokalen Wertschöpfung hoch, wobei diese durch entsprechende Investitionen in Fähigkeiten und Produktionsstandorte im Laufe der Zeit noch gesteigert werden könnte. Diese lokalen Vorteile sind hier stärker ausgeprägt als bei anderen erneuerbaren Technologien, etwa der PV, und fördern insbesondere in Ländern mit zunehmender Industrialisierung die wirtschaftliche Entwicklung. Sie schaffen lokale Arbeitsplätze, Wohlstand und *Know-how*. Dies macht CSP zu einer besonders gut geeigneten Technologie für die MENA-Region.

Die *zweite Herausforderung* besteht darin, die Netzanschlüsse und Marktmechanismen zur Integration von Solarstrom in Europa und der MENA-Region zu etablieren. Wenn erhebliche Mengen des CSP-Stroms aus der MENA-Region nach Europa exportiert werden, so sind große Investitionen in Netzverbindungen zwischen den MENA-Ländern und Europa sowie in HGÜ-Leitungen innerhalb Europas nötig, um den Strom in die Abnahmezentren zu transportieren.

Weitere Studien im Bereich der Systemsimulation sollten unter der Verwendung hochauflösender und (idealerweise) auch stochastischer Netzmodelle durchgeführt werden, um die Wechselwirkungen von unterschiedlichen Anteilen erneuerbarer Energien auf EU-, MENA- und EU-MENA-Verbundnetzen zu untersuchen. Das Verständnis aus diesen Studien sowie die Daten über Lernraten von CSP- und PV-Technologien sollten verwendet werden, um die Entwicklung einer optimalen Mischung für die Nutzung der solaren Ressourcen und der notwendigen Übertragungsinfrastruktur zu leiten.

Die *dritte Herausforderung* bezieht sich auf die Entwicklung von CSP in der MENA-Region als ein potenziell wichtiger Bestandteil von Initiativen, um eine kohlenstoffarme wirtschaftliche Entwicklung und politischen Fortschritt in dieser Region zu unterstützen. Dabei sollten Bedenken hinsichtlich der Versorgungssicherheit, die durch eine starke Abhängigkeit Europas von Solarstrom aus der MENA-Region gefährdet sein könnte, Berücksichtigung finden. Angesichts der rasant steigenden Nachfrage nach Strom in den MENA-Ländern könnte und sollte ein Großteil der durch solarthermische Kraftwerke erzeugten

Elektrizität kurz- bis mittelfristig lokal in der MENA-Region verwendet, anstatt nach Europa exportiert werden. Dadurch könnte die Konstruktion von fossil befeuerter Leistung in der MENA-Region vermieden werden. Finanzierungsmodelle und damit verbundene politische Vereinbarungen zwischen der EU und den MENA-Ländern werden benötigt, um diese kurz- bis mittelfristigen Entwicklungen zu ermöglichen. Ohne finanzielle Verpflichtungen in der Größenordnung von Milliarden Euro aus Europa ist es unwahrscheinlich, dass sich erneuerbare Energietechnologien, einschließlich der CSP, schnell in der MENA-Region entwickeln werden.

Mit Blick auf 2050 besteht das Potenzial von signifikanten Stromexporten nach Europa, falls die Investitionen in die CSP-Leistung in der MENA-Region dazu ausreichen. Es ist möglich, dass auch Exporte von solar erzeugtem Wasserstoff- und Synthesegas eine Rolle spielen werden. Die durch den Barcelona-Prozess,⁸ durch die Deauville-Partnerschaft⁹ usw. erwartete engere wirtschaftliche und soziale Integration der EU und der MENA-Region ist essenziell, um Bedenken hinsichtlich der Versorgungssicherheit auszuräumen. Importierter Solarstrom aus der MENA-Region würde die Abhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern, aus dieser und anderen Regionen, senken.

Es gibt zwei Gründe für Europa, den CSP-Einsatz in der MENA-Region zu unterstützen. Sie stammen aus Europas Verpflichtungen, eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung in dieser Region zu fördern. *Erstens* ist CSP eine attraktive und eine einfach zu integrierende Möglichkeit, die CO₂-Emissionen aus dem erhöhten Energieverbrauch, der mit dem Bevölkerungswachstum und wirtschaftlicher Entwicklung in dieser Region einhergeht, zu begrenzen. *Zweitens* können lokale Zulieferer einen wesentlichen Teil der Aktivitäten, die für die Konzeption, den Bau und den Betrieb der Solarkraftwerke nötig sind, liefern. Somit werden eine regionale Entwicklung gefördert und Arbeitsplätze geschaffen. Dies stellt einen Beitrag zu einer stabilen Gesellschaft dar.

Ein abgestimmter Ansatz ist erforderlich, um gleichzeitig die verschiedenen Engpässe (Investitionsschutz, energiepolitische Anreize, Forschung und Entwicklung usw.) und die Ermittlung von Möglichkeiten zur Senkung von Eintrittsbarrieren für andere Akteure zu behandeln. Zu diesem Zweck muss ein Transformationsprozess gestaltet und über einen langen Zeitraum wissenschaftlich unterstützt werden. Wissenschaftliche Akademien in Europa und der MENA-Region können eine nützliche Rolle bei der Unterstützung dieses Prozesses spielen.

8 Der Barcelona-Prozess bezeichnet die Entwicklung einer institutionalisierten Beziehung der Europäischen Union (EU) zu ihren Nachbarländern im südlichen Mittelmeerraum in Form von Handels- oder Kooperationsabkommen.

9 Die Deauville-Partnerschaft mit den arabischen Transformationsstaaten ist eine internationale Initiative, die von der G8 in Deauville 2011 auf den Weg gebracht wurde, um Staaten in der arabischen Welt zu unterstützen, „die sich im Übergang hin zu freien, demokratischen und toleranten Gesellschaften befinden“.

Literatur

- ARINGHOFF, R., GEYER, M., HERRMANN, U., KISTNER, R., NAVA, P., and OSUNA, R.: *AndaSol – 50MW Solar Plants with 9 Hour Storage for Southern Spain*. Zurich: SolarPaces Conference 2002
- California Energy Commission: Large Solar Energy Projects*. 2010
Available online at: <http://www.energy.ca.gov/siting/solar/index.html> (2010)
- CSP Today: CSP World Plant Locations*. 2011
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt): Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region*. Final Report for German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. 2005
Available online at: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/MED-CSP_complete_study.pdf
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), TRANS-CSP (Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power): Final Report for Study Commission*. Ed. by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, Germany 2006
Available online at: www.dlr.de/tt/trans-csp
- EASAC (European Academies Science Advisory Council): Concentrating Solar Power: Its Potential Contribution to a Sustainable Energy Future*. EASAC Policy Report 16 (2011)
Available online at: <http://www.easac.eu/home/reports-and-statements/detail-view/article//concentratin.html>
- Europäische Kommission: Energy 2020: A strategy for competitive, sustainable and secure energy*. Communication from the Commission COM 2010/639 final (2010)
Available online at: <http://www.energy.eu/directives/com-2010-0639.pdf>
- Europäische Kommission: A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050*. Communication from the Commission, 8.3.2011, COM 2011/112 final (2011a)
Available online at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:EN:PDF>
- Europäische Kommission: On security of energy supply and international cooperation – “The EU energy policy: engaging with partners beyond our borders”*. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions COM 2011/539 final (2011b)
Available online at:
<http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:52011DC0539:EN:HTML:NOT>
- GEYER, M., and MANCINI, T.: *From research to CSP market introduction. Progress and Advances of Concentrating Solar Power Technologies* 2006
Available online at: <http://www.tvworldwide.com/events/eqtv/061016/ppt/Michael%20Geyer.pdf>
- Greentechmedia: US CSP Project Tracker*. 2011
Available online at:
<http://www.greentechmedia.com/images/wysiwyg/research-blogs/USCSPProjectTracker.pdf>
- International Energy Agency (IEA): Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*. 2010. Available online at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/csp_roadmap.pdf
- IIASA: Expanding solar energy in North Africa to achieve climate targets*. IIASA Policy Brief No. 7 (2009)
Available online at: <http://www.iiasa.ac.at/Admin/PUB/policy-briefs/pb07-web.pdf>
- MANCINI, T., and HELLER, P. (Eds.): *Dish-stirling systems: An overview of development and status*. *J. Solar Energy Engineering* 125, 135–151 (2003)
- MÜLLER-STEINHAGEN, H., and TRIEB, F.: *Concentrating Solar Power (Part 1)*. *Ingenia – Royal Academy of Engineering* (2004)
- NAGL, S., FÜRSCHE, M., JÄGEMANN, C., and BETZÜGE, M.: *The Economic Value of Storage in Renewable Power Systems – the Case of Thermal Energy Storage in Concentrating Solar Power Plants*. *EWI Working Paper No. 11/08* (2011)
Available online at: <http://www.ewi.uni-koeln.de/publikationen/working-paper/>
- PITZ-PAAL, R.: *High temperature solar concentrators*. In: BLANCO GALVEZ, J., and MALATO RODRIGUEZ, S. (Eds.): *Solar Energy Conversion and Photoenergy Systems*. In: *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO. Oxford, UK: Eolss Publishers 2007
- PITZ-PAAL, R.: *Concentrating Solar Power*. In: LETCHER, T. M. (Ed.): *Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for our Planet*; pp. 171–192. Oxford: Elsevier 2008

- PITZ-PAAL, R., DERSCH, J., and MILOW, B.: European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping (ECOSTAR): roadmap document, SES6-CT-2003–502578. 2005a
Available online at: <http://www.promes.cnrs.fr/uploads/pdfs/ecostar/ECOSTAR.Summary.pdf>
- PITZ-PAAL, R., DERSCH, J., MILOW, B., TELLEZ, F., FERRIERE, A., LANGNICKEL, U., STEINFELD, A., KARNI, J., ZARZA, E., and POPEL, O.: Concentrating Solar Power plants – How to achieve competitiveness. VGB PowerTech 8, 46–51 (2005b)
- PRICE, H., and KEARNEY, D.: Recent advances in parabolic trough solar power technology. Advances in Solar Energy 16 (2005)
- Protermosolar, Mapa de la Industria Solar Termoeléctrica en España* (Map of the Solar Thermal Power Industry in Spain). Available online at: <http://www.protermosolar.com/mapa.html>, 2011
- ROMERO, M., BUCK, R., and PACHECO, J. E.: An update on solar central receiver systems, projects, and technologies. J. Solar Energy Engineering 124, 98–108 (2002)
- TRIEB, F.: SOKRATES-Projekt: Solarthermische Kraftwerkstechnologie für den Schutz des Erdklimas. DLR 2004
Available online at: http://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/projects/API_3_ATHENE.pdf
- TRIEB, F., et al.: MED-CSP Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region. 2005
Available online at: <http://www.dlr.de/tt/med-csp>
- TRIEB, F., et al.: TRANS-CSP Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. 2006
Available online at: <http://www.dlr.de/tt/trans-csp>
- UMMEL, K., and WHEELER, D.: Desert Power: the Economics of Solar Thermal Electricity for Europe, North Africa and the Middle East. Center for Global Development. Working Paper No. 156 (2008)
Available online at: www.cgdev.org/files/1417884_file_Desert_Power_FINAL_WEB.pdf
- US Bureau of Land Management: Pending Arizona BLM Solar Projects*. 2011
Available online at: <http://www.blm.gov/az/st/en/prog/energy/solar/pend-solar.html>
- WILLIGES, K., LILLIESTAM, J., and PATT, A.: Making concentrated solar power competitive with coal: The costs of a European feed-in tariff. Energy Policy 38/6, 3089–3097 (2010)

Prof. Dr. Robert PITZ-PAAL
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Solarforschung
Linder Höhe
51147 Köln-Porz
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 2203 6012744
Fax: +49 2203 6014141
E-Mail: Robert.Pitz-Paal@dlr.de

Dekarbonisierung im Baustoffsektor

Peter STEMMERMANN und Matthias ACHTERNBOSCH (Karlsruhe)

Mit 10 Abbildungen



Zusammenfassung

Die Entwicklung nachhaltiger und kostengünstiger, weltweit nutzbarer mineralischer Baustoffe mit verbesserten Eigenschaften ist eine immense Herausforderung. Alleine die Herstellung von Zement ist für etwa 8% der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich (ACHTERNBOSCH et al. 2011). Der daraus hergestellte Beton, nach Trinkwasser der weltweit in größter Menge genutzte Stoff, wird in Deutschland zu über 70% im Hochbau des Gebäudebestands eingesetzt (AKMF 2009). Neben mineralischen Rohstoffen und Energie („graue Energie“) werden für tragende Elemente außerdem enorme Mengen Stahl benötigt, um die notwendige Biegezugfestigkeit zu erreichen (ca. 10% der Stahlproduktion). Etwa 40% der Endenergie wird gebäudebezogen verwendet (BMVBS 2012).

Um den Baustoffsektor in Bezug auf Klimaschutz und Ressourceneffizienz zukunftsfähig zu machen, müssen zementäre Systeme und Betone entwickelt werden, die eine drastische Absenkung der grauen Energie und der CO₂-Emission bei der Herstellung ermöglichen (VON WEIZSÄCKER et al. 2010). Außerdem sollte die Wärmedämmfunktion heutiger kompositen, oft teurer Materialien in den Beton integriert werden, um eine deutliche Kostensenkung und Einsparung von Ressourcen zu ermöglichen. Längerfristig sollte Stahl in Beton ersetzt werden. Letztlich zielt die Strategie auf die Integration von Funktionen in Massenbaustoffe ab, die bisher nur durch additive Technologien erreicht werden können. Solche Baustoffe werden als integriert effiziente Baustofftechnologien bezeichnet.

Innovationszeiträume für mineralische Baustoffe betragen aufgrund des komplexen Umfelds aus Zulassung und normativen Anforderungen heute oft 10 Jahre und mehr. Schnellere Innovations sprünge könnten durch grundlagenbasierte Entwicklungen und durch auf die neuen Anforderungen ausgerichtete Prüfungs- und Zulassungsvorschriften erreicht werden. Dies wird am Beispiel des neuen Zements Celiment gezeigt, der Einsparungen von je 50% CO₂-Emission und „grauer Energie“ zum Ziel hat.

Abstract

The need for sustainable and cost-effective, globally available mineral construction materials with improved properties is an immense challenge. Just the production of cement is responsible for about 8% of man-made CO₂ emissions (ACHTERNBOSCH et al. 2011). Concrete made from it ranks second in mass in the list of world's processed materials after drinking water. In Germany more than 70% of concrete are used in the building stock (AKMF 2009). In addition to mineral resources and energy (“embodied energy”) also enormous quantities of steel are used for structural elements to achieve the required tensile strength (about 10% of steel production). Roughly 40% of end energy is used building-related (BMVBS 2012).

In order to cope with climate change and global growth a resource efficient and sustainable building materials sector is needed. Key elements are cement and concrete systems with drastically reduced embodied energy and strongly reduced CO₂ emissions during manufacturing (VON WEIZSÄCKER et al. 2010). To allow for a significant reduction in costs and save resources thermal insulation properties should be integrated into the concrete to avoid today's often expensive composite heat insulation systems. In the longer term steel in concrete should be replaced. Ultimately, the aim of the strategy is to integrate functions in bulk construction materials that today can only be achieved by additive technologies. Such materials are referred to as integrated efficient building technologies.

Today innovation periods for mineral construction materials often last 10 years or more due to the complex environment of approval and normative requirements. Faster innovation steps could be achieved by integrated approaches, which link fundamental research, industries, standardization and approval aligned to the new requirements. This is demonstrated on the example of the new cement “Celiment”, which aims on 50% savings of “embodied energy” and CO₂ emissions each.

1. Baustofftechnologie und Klimaschutz

Wenn heute über neue Technologien zum Klimaschutz diskutiert wird, denkt die Mehrzahl der Menschen an spritsparende Autos oder Flugzeuge, an erneuerbare Energien wie Solar- oder Windenergie, selten aber an Baustoffe. Dabei werden ca. 40% der in Deutschland genutzten Endenergie gebäudebezogen verwendet (*BMVSB* 2012). Ungenutzte Potentiale in diesem Bereich wirken oft 50 bis 100 Jahre über die Errichtung des Gebäudes hinaus; daher müssen sie besonders dringlich entwickelt werden. Im Kreis der sachverständigen Berater der Bundesregierung sind diese Tatsachen bekannt. Aus diesem Grund legt das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (*BMWi* 2011) einen wesentlichen Schwerpunkt auf Energieeffizienz und energieoptimiertes Bauen. Ziel ist es, bis 2050 in Deutschland einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen.

Aktuelle Konzepte setzen hierzu auf neue Gebäude- und Konstruktionstechniken sowie neue Materialien, die zum Beispiel als passive Bauelemente wie Wärmedämmverbundsysteme eingesetzt werden (*BMWi* 2011). Die heutigen Anforderungen an Bauwerke, die mit den im Grunde seit über 100 Jahren weitgehend unveränderten traditionellen Baustoffen nicht erfüllbar sind, werden also durch additive, nachgeschaltete Baustofftechnologie erreicht. Die traditionellen Baustoffe selber werden nicht in Frage gestellt. Das zeigt sich auch an den bisher eingeführten Zertifizierungssystemen für nachhaltiges Bauen,¹ die soziale und ökonomische Kriterien zu Ungunsten von nachhaltigen Baustoffen in den Vordergrund rücken.

Nachgeschaltete technologische Lösungen bedingen allerdings stets einen quantitativ und qualitativ steigenden Einsatz von Ressourcen. Dies betrifft die eingesetzten Rohstoffe, die zu ihrer Herstellung notwendige Energie sowie weitere zusätzliche ökonomische und ökologische Kosten. Zudem werden Probleme in andere Lebensphasen des Bauwerks verlagert: die zunehmend komplexen Materialverbünde aus mineralischen, metallischen organischen und polymeren Stoffen erschweren zum Beispiel eine einfache und hochwertige Wiederverwertung. Langfristig bedeutsam ist eine weitere Wirkung nachgeschalteter Technologien: Sie vermindern den Innovationsdruck in der traditionellen Baustoffindustrie, da die althergebrachten Standards mit inkrementellen Innovationen die Anforderungen des Marktes weiterhin erfüllen, und führen zu einem rein preisdominierten Wettbewerb. Auf das Gesamtbauwerk bezogen sind die so erzielten Kostenvorteile allerdings gegenüber den Zusatzkosten, die durch die nachgeschalteten Baustofftechnologien entstehen, irrelevant. Insbesondere Sanierungen im Bestand sind daher heute oft nur über hohe Subventionen am Markt umsetzbar. Das Energieforschungsprogramm der Bundesregierung legt aus diesem Grund einen Schwerpunkt auf Kostenreduktion, wobei die Förderung der Forschung und Entwicklung grundsätzlich auf nachgeschaltete Technologien ausgerichtet bleibt.

Eine solche nationale Strategie greift jedoch zu kurz, auch wenn schnell hohe Effizienzgewinne vor allem im Gebäudebestand erreicht werden können. In der langfristigen Perspektive wird so die Entwicklung nachhaltigerer Lösungen eher blockiert.

¹ Als Beispiel sei das Deutsche Gütesiegel für die Nachhaltigkeit von Bauwerken genannt. Es ist ein Gemeinschaftsprojekt des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (*BMVBS*) und der 2007 gegründeten Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (*DGNB*). Das Gütesiegel definiert Qualitätskriterien in Bezug auf ökologische, ökonomische und soziokulturelle Aspekte – also alle drei Säulen der Nachhaltigkeit.

Neue Baustofftechnologien, die nachgeschaltete Technologien verzichtbar machen, sind allein schon deshalb notwendig, da die existierenden nachgeschalteten Lösungen in den größten und sprunghaft wachsenden Märkten der Dritten Welt aus finanziellen Gründen kaum eingesetzt werden. Komplexe Materialverbünde stellen also vermutlich eher Brückentechnologien für wohlhabende Industrienationen dar als substantielle Beiträge zum globalen Klimaschutz. Dabei ergeben sich für neue, effizientere Baustofftechnologien auch wirtschaftlich im Inland und im Export herausragende Perspektiven.

Aus was besteht aber weltweit der Kern moderner Gebäude? Welches Material ist so universell einsetzbar, dass es durch Integration zusätzlicher Eigenschaften die Perspektive besitzt, die Baustofftechnologie zu revolutionieren?

2. Schlüssel zur Ressourceneffizienz im Baustoffsektor – Beton

Beton ist das weltweit in größter Menge hergestellte Material. Mit etwa 20 Mrd. t/a (Steinkohleförderung 6 Mrd. t, Erdölförderung 5 Mrd. t) wird nur Trinkwasser in größerer Menge benötigt. Dies entspricht etwa $1,2 \text{ m}^3$ Beton pro Kopf und Jahr oder insgesamt ca. 8 km^3 – dem Volumen des Matterhorns (Abb. 1).

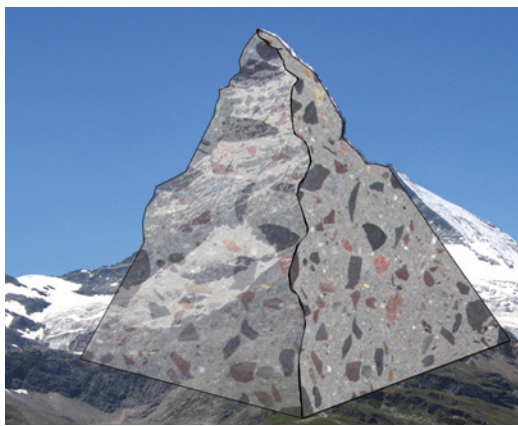


Abb. 1 Weltweit wird jährlich Beton mit dem Volumen des Matterhorns verbaut (angenommene Pyramidenhöhe 2,1 km; Seitenlänge 3,4 km).

Die Erfolgsgeschichte des Betons liegt in der Kombination seiner Eigenschaften begründet: Er ist fast beliebig formbar, fest, dauerhaft und überall verfügbar. Ein anderes Material mit einer vergleichbaren Kombination von Eigenschaften ist nicht bekannt. Damit wird Beton auf absehbare Zeit nicht durch andere Materialien ersetzt werden können.

Die Technik, verfügbare Gesteine unterschiedlicher Körnung unter Einsatz von nur etwa 15% Bindemittel zu Beton zu verkleben, wurde bereits in der Antike entwickelt und führte zu extrem langlebigen Gebäuden – einzelne Betongebäude aus römischer Zeit stehen heute noch. Allerdings war mit den damals eingesetzten Bindemitteln nur ein langsamer Baufortschritt möglich. Auch andere Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit und Festigkeit konnten mit modernem Beton nicht mithalten.

Heute wird für Beton neben Sand, Kies und Wasser als Bindemittel Zement benötigt, der auf Zementklinker basiert. Im Gegensatz zu Beton ist Zementklinker eine geniale Erfindung des 19. Jahrhunderts. Das neue Produkt und insbesondere das ebenfalls neue Herstellungsverfahren schufen eine wesentliche Voraussetzung für die industrielle Revolution: Beton konnte nunmehr in Massen und billig produziert sowie einfach, schnell und robust verarbeitet werden. Diese zentralen Anforderungen an einen Beton sind bis heute aus Sicht des Kunden gleich geblieben. Energie- und Ressourceneffizienz oder eine besondere Leistungsfähigkeit, über die genormten Eigenschaften hinaus, spielen kaum eine Rolle. Erst durch die Globalisierung und die damit virulent werdende Diskussion um Klimaschutz und Ressourcenknappheit gewinnen Aspekte der Nachhaltigkeit täglich an Brisanz.

Zementklinker ist in seiner Herstellung sehr energieintensiv – etwa 3 % des weltweiten Primärenergiebedarfs werden dafür benötigt. Etwa ein Drittel der Rohstoffe besteht aus chemisch gebundenem CO₂, das beim Brennen freigesetzt wird. Weitere hohe CO₂-Emissionen entstehen aus den eingesetzten Brennstoffen. Trotz der hohen CO₂-Emission der Zementherstellung ist der spezifische CO₂-Fußabdruck einer Tonne Beton erstaunlich niedrig – da sie im Mittel nur etwa 150 kg Zement enthält.

Der durchschlagende Erfolg des Baustoffsystems Beton führt allerdings heute zu einem extrem steigenden Zementverbrauch – 2005 stammten 5 % der weltweiten Treibhausgasemissionen (HERZOG 2009) aus der Zementherstellung – heute geht man von etwa 8 % aus (ACHTERNBOSCH et al. 2011), ohne dass eine Trendwende absehbar wäre (Abb. 2). Diese Entwicklung ist langfristig nicht akzeptabel und verlangt neue Ansätze um die Innovationsgeschwindigkeit und -höhe zu steigern.

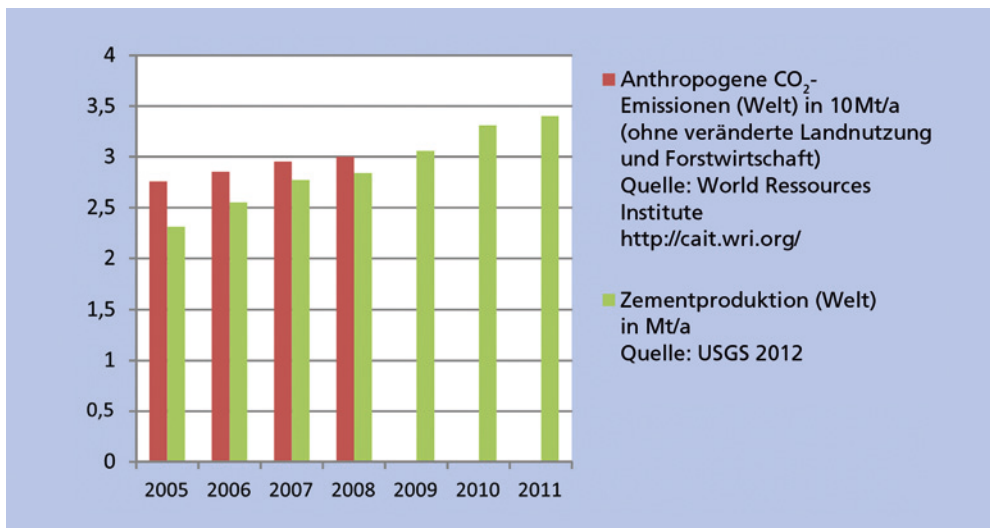


Abb. 2 Weltweite Zementproduktion und anthropogene CO₂-Emission 2005–2011

3. Ein Schritt zur Lösung: Ressourceneffizienter Zement

An der Entwicklung alternativer Zemente wird seit Jahrzehnten gearbeitet, ohne dass im Massenmarkt ein Durchbruch erreicht werden konnte. Dies liegt im Wesentlichen an den enormen Anforderungen, die an ein massentaugliches Produkt gestellt werden müssen. Geht man von Deutschland als Markt aus, der die globalen Entwicklungen um ein bis zwei Jahrzehnte vorwegnimmt, müssen die Materialeigenschaften wie Festigkeit, Dauerhaftigkeit, universelle Einsatzbarkeit usw. tendenziell heutige Standardzemente übertreffen. Speziell die Umsetzung der Energiewende führt zu steigenden Qualitätsansprüchen. Die neuen Materialien müssen aus weltweit verfügbaren Rohstoffen unter Einsatz einer reduzierten Energiemenge hergestellt werden können. Ein einfaches stoffliches Recycling ist wünschenswert. Alle diese Eigenschaften müssen zu einem Preis umgesetzt werden können, der ohne Subvention wettbewerbsfähig ist. Zusätzlich müssen aufgrund der hohen Investitionskosten und der langen Anlagenlaufzeiten die Absatzrisiken für den Hersteller minimal sein. Dies bedeutet etablierte Produktionsverfahren und Anwendungsvorschriften, Prüfzertifikate nach gesetzlichen und normativen Regelwerken sowie eine gleichartige und insbesondere mit den gleichen Maschinen mögliche Verarbeitung wie konventioneller Zement. Schließlich sollen die Produkte möglichst sofort im Massenmarkt verfügbar und kompatibel mit Standardzementen sein.

Einzelne dieser Anforderungen sind durch verschiedene Ansätze darstellbar. In Kombination und unter dem in der Zementindustrie üblichen hohen Zeit- und Kostendruck ist die Entwicklung solcher Materialien aus der Branche heraus aber nahezu ausgeschlossen. Tatsächlich haben diese Rahmenbedingungen dazu geführt, dass fast alle neuen Entwicklungen wieder vom Markt verschwunden sind. Nach Einschätzung der meisten Marktteilnehmer wäre ein im Vergleich zu konventionellem Zement *in summa* 50% teureres Bindemittel mit identischer Leistungsfähigkeit, aber halbem CO₂-Ausstoß heute am Markt ohne direkten staatlichen Eingriff nicht absetzbar. Diese Situation ist eigentlich paradox, da die Verwendung eines solchen Bindemittels die Gesamtkosten eines Bauwerks nicht wesentlich verteuern würde.

3.1 Technische und ökonomische Entwicklungen

Klimaschutz und Kostendruck haben in den letzten Jahren zu erheblichen Verbesserungen im Herstellungsverfahren konventionellen Zements geführt. Zum einen werden in Deutschland heute statt fossilen Energieträgern wie Kohle, Öl und Gas vorwiegend Sekundärbrennstoffe mit zum Teil hohen biogenen Anteilen zur Herstellung eingesetzt. Dabei handelt es sich meist um aufbereitete Fraktionen aus Industrie und Gewerbe, Fraktionen aus Siedlungsabfällen, Klärschlamm und Altreifen, um nur die wichtigsten zu nennen (VDZ 2011). Damit wird zwar der CO₂-Ausstoß nicht verringert, es werden aber immerhin Reststoffe verwertet. Auch ingenieurtechnische Verbesserungen haben zur Senkung des Energiebedarfs beigetragen. Die auf diese Art in Zukunft möglichen Effizienzgewinne werden aber als sehr gering eingeschätzt. Andererseits wird versucht, Zementklinker durch latent hydraulische Reststoffe, d. h. durch Materialien wie Hüttensand bzw. Flugasche, die in Gegenwart von Zement hydraulisch reagieren, zu ersetzen. Allerdings sind die Potentiale an latent hydraulischen Stoffen zur Herstellung dieser sogenannten Kompositzemente bereits weitgehend ausgeschöpft (VDZ 2012). Fast alle latent hydraulischen Stoffe stammen zudem aus thermischen Verfahren und tragen damit einen ökologischen Rucksack – je nach

Allokation zum Herkunftsprozess oder zum Sekundärprozess kann dieser sogar größer sein als der des Zementklinkers.

Verschiedene Ansätze versuchen diese Begrenzungen zu umgehen, indem andere Rohstoffe eingesetzt werden: Ein seit etwa 50 Jahren verfolgter Ansatz sind Geopolymere. Es handelt sich um zementäre Systeme, die latent hydraulische Alumosilikate mit Alkali-hydroxiden wie Natronlauge anregen. Tatsächlich sind solche Systeme allerdings bis jetzt nur dann anwendbar, wenn die bereits heute zur Zementproduktion erschöpfend genutzten Ressourcen Flugasche bzw. Hüttensand zur Geopolymerproduktion eingesetzt würden (JUENGER 2011, VAN DEVENTER 2012). Andere Ansätze, wie das am *Imperial College* entwickelte Novacem, setzen auf Magnesiumsilikate als Rohstoffe – einer der mineralischen Sequestrierung entlehnten Technologie, die bisher nicht wirtschaftlich umsetzbar ist (ACHTERNBOSCH 2012a, b). Zudem ist die weitere Zukunft von Novacem ungewiss, da sich aktuell die bisherigen Investoren zurückgezogen haben. Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass die Integration von magnesiahaltigen Komponenten in herkömmliche klinkerbasierte Zemente keine Vorteile bietet (VANDEPERRE et al. 2008).

3.2 Entwicklung eines ressourceneffizienten Zements: Celitement

Nahezu alle heute eingesetzten Zemente enthalten als Hauptkomponente Zementklinker, zu dessen Herstellung, wie bereits angesprochen, eine große Menge Energie benötigt und sehr viel CO₂ in die Atmosphäre ausgestoßen wird. Beide Faktoren, der Energiebedarf und die CO₂-Emission, sind direkt mit der Entsäuerung von Kalk, d. h. der Umkehrung der natürlichen Kalkfällung unter CO₂-Freisetzung, verbunden. Vereinfacht werden 3 Teile Kalk und 1 Teil Sand (SiO₂) bei bis zu 1450 °C unter Freisetzung von 3 Teilen CO₂ zur Reaktion gebracht. Es entsteht ein Teil Ca₃SiO₅ („Tricalciumsilikat“ oder Alit), der Hauptbestandteil von Zementklinker (Gleichung [1]):



Eine thermodynamische Betrachtung der Gesamtreaktion zeigt, dass der Prozess energetisch durch die Entsäuerung des Kalks dominiert wird (Abb. 3).

Soll mit Hilfe des Bindemittels Zement ein Bauteil oder letztlich ein Gebäude hergestellt werden, ist neben Sand und Kies die Zugabe von Wasser nötig. Dieses reagiert mit dem Zementklinker unter Bildung neuer, wasserhaltiger Minerale, deren Gefüge für die Festigkeit des Bauteils verantwortlich ist. Entscheidend ist insbesondere die Bildung sogenannter Calcium-Silikat-Hydrate (C-S-H). Die in den Klinkermineralen enthaltenen isolierten Silikattetraeder werden dabei zu Kettenelementen unterschiedlicher Länge verknüpft. Das Grundprinzip ähnelt der Polymerisation von Kunststoffen. Vereinfacht lässt sich die Reaktion wie folgt formulieren (Gleichung [2]):



Tricalciumsilikat reagiert bei Zugabe von 3 Teilen Wasser zu 2 Teilen Calciumhydroxid und einem Teil C-S-H, wobei Calciumhydroxid als Füllstoff keinen wesentlichen Beitrag zu den mechanischen Eigenschaften liefert. Calciumhydroxid stellt allerdings einen alkalischen Puffer dar.

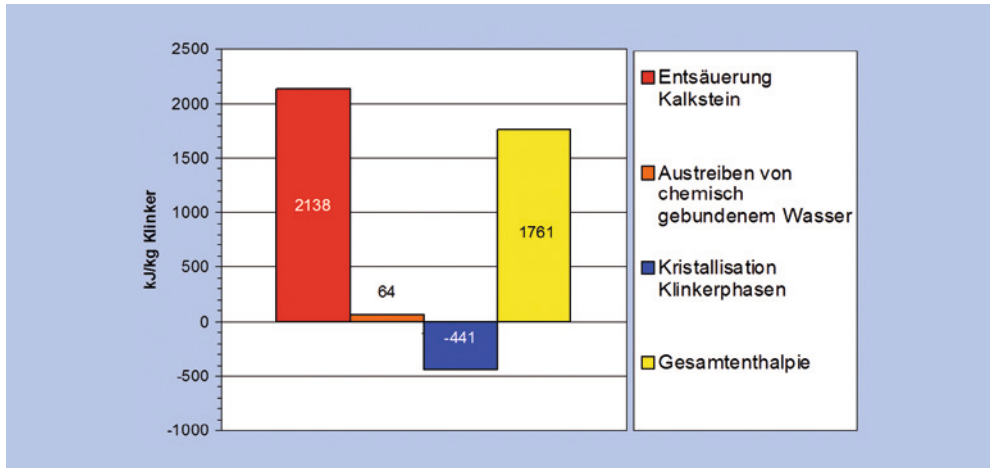


Abb. 3 Bildungsenthalpie der Herstellung von 1 kg Zementklinker aus den Rohstoffen, berechnet aus den Enthalpien der Teilreaktionen (vereinfacht nach TAYLOR 1990).

Eine Analyse der Rohstoffe, die zur Herstellung ressourceneffizienter Zemente zur Verfügung stehen, schränkt die Auswahl der chemisch möglichen Systeme stark ein. Weltweit verbreitete Gesteine sind modal im Wesentlichen aus den 7 Hauptoxiden und Wasser (CaO , MgO , Na_2O , K_2O , H_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) aufgebaut. Die Forderung nach Kompatibilität mit konventionellem Zement schließt nach den bestehenden Normen große Mengen MgO von der Nutzung aus. Mineralische Ressourcen, die Al_2O_3 und Fe_2O_3 in großen Mengen und höheren Konzentrationen enthalten, sind eher selten und werden als Erz oder in der keramischen Industrie genutzt. Damit stehen diese Ressourcen auch für die Herstellung von Geopolymeren kaum zur Verfügung. Alkalien sind in nahezu allen Gesteinen in Gehalten um 5% vorhanden. Höhere Konzentrationen sind fast ausschließlich auf Salzlagerstätten begrenzt und damit nur eingeschränkt verfügbar und mit wasserlöslichen, für konventionellen Zement schädlichen Elementen wie Chlor vergesellschaftet. Breite Erfahrung ist dagegen im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ mit Nebenelementen vorhanden. Dieses System wird auch in heutigen Zementen genutzt.

Unter Abwägung der Chancen und Risiken besitzt daher die Entwicklung ressourceneffizienter Zemente im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ mit Nebenelementen höchste Priorität. Damit können die bisherigen Rohstoffe weiter verwendet werden. Forschungsziel ist es, die mit dem konventionellen Verfahren und insbesondere mit dem Einsatz von Kalk verbundenen Nachteile möglichst zu vermeiden.

Nach Gleichung [2] ist zur Bildung des Klebers C-S-H im System $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ prinzipiell nur ein Drittel des konventionell eingesetzten Calciums und damit auch nur ein Drittel des herkömmlich verbrauchten Kalkes nötig. Offensichtlich wäre eine Verringerung des eingesetzten Kalkanteils in der Zementproduktion um zwei Drittel sinnvoll – wenn dies ohne Qualitätsverlust möglich ist. Im konventionellen Zementbrennprozess führt eine Reduktion des Kalkgehalts allerdings zu nicht reaktiven, d. h. nicht hydraulischen Produkten.

Daher wurde nach hydraulischen Verbindungen gesucht, die sich bei niedrigem Kalkverbrauch herstellen lassen. Diese müssen in ihrer Struktur isolierte Silikattetraeder oder Dimere aufweisen, um die gewünschte Reaktion zu höher polymeren Silikaten (C-S-H) zu ermöglichen. In eigenen Untersuchungen mit Photoelektronenspektroskopie wurden

solche Verbindungen in wenigen Nanometer dicken Schichten als Zwischenprodukte der hydraulischen Reaktion der konventionellen Klinkerminerale Alit und Belit ($\beta\text{-Ca}_2\text{SiO}_4$) indirekt nachgewiesen (BLACK et al. 2003). Ihr direkter Nachweis ist bisher nicht eindeutig möglich. Die Verbindungen enthalten chemisch an Silikat gebundenes Wasser und werden als Calciumhydrosilikate bezeichnet. Charakteristisch für diese Zwischenprodukte ist, dass sie Si-OH-Gruppen (Silanolgruppen) enthalten. In Reinform waren sie bisher nicht bekannt. Um die Eignung von hydraulischen Calciumhydrosilikaten als Zement untersuchen zu können, wurde ein geeignetes Herstellungsverfahren entwickelt, das unabhängig von der Hydratation von Klinkerphasen ist.

Da die Calciumhydrosilikate nominell Wasser enthalten, ist eine Herstellung bei hohen Temperaturen (über etwa 300°C) nicht praktikabel. Andererseits ist für einen Massenbaustoff wie Zement ein schneller Reaktionsumsatz unter Beteiligung flüssiger oder gasförmiger Phasen unverzichtbar. Im Falle des konventionellen Zements liegt im Brennprozess eine Teilschmelze als flüssige Phase vor. Das geeignete Medium zur Herstellung von Calciumhydrosilikaten ist Wasser bzw. Wasserdampf. Für einen schnellen Umsatz sollte die Temperatur möglichst hoch sein – wobei verfahrenstechnisch Temperaturen über 200°C nur aufwändig und damit wenig ökonomisch zu handhaben sind. Technisch einfach und im Bereich Baustoffe seit über 50 Jahren erprobt, ist die Herstellung von Calciumsilikat-hydraten wie Tobermorit im Autoklaven bei ca. 190°C unter Sattampfdruck.

Unter diesen Bedingungen lassen sich leicht Verbindungen synthetisieren, die die oben formulierten Ansprüche an hydraulische Ersatzstoffe für die bekannten Klinkerphasen erfüllen. Als Beispiel wird im Folgenden $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ oder abgekürzt C_2SH betrachtet, eine in industriellen Prozessen meist nicht erwünschte Verbindung, die isolierte Silikattetraeder mit Silanolgruppen enthält. Die Phase reagiert allerdings nach Zugabe von Wasser bei Raumtemperatur nicht unter Bildung neuer Verbindungen, obwohl sie thermodynamisch unter diesen Bedingungen nicht stabil ist. Wie ist das zu erklären? Die Struktur des $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ ist durch ein extrem komplexes System von Wasserstoffbrückenbindungen stabilisiert (MARSH 1996), – um die Verbindungen dennoch mit Wasser zur Reaktion zu bringen, ist Aktivierungsenergie nötig (Abb. 4, *links*). Daher wurde auf unterschiedliche Weise versucht, vor der Wasserzugabe kontrolliert Energie in die Struktur einzutragen, um sie in einen thermodynamisch labilen Zustand zu versetzen.

Einfaches Aufheizen von $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ führt zur Freisetzung von Wasser. Dabei wird die Struktur vollständig zerstört. Es entstehen verschiedene Modifikationen von Ca_2SiO_4 oder Dellait (GARBEV et al. 2008) – beide Produkte sind als Bindemittel wenig geeignet. Mahlen von $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ in Anwesenheit von Wasser führt zur sofortigen Bildung von C-S-H und damit zur Verfestigung des Ausgangsstoffs in der Mühle. Durch trockenes gemeinsames Vermahlen von $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ und einer weiteren SiO_2 -Quelle gelingt es dagegen, lediglich die Wasserstoffbrücken in der Struktur zu stören (Abb. 4, *rechts*). Das gemahlene Pulver ist chemisch aktiv und reagiert bei Zugabe von Wasser unter Verfestigung zur bekannten „Klebphase“ C-S-H.

Die Hydratation lässt sich hervorragend im Kryo-Elektronenmikroskop verfolgen (Abb. 5). Nach einigen Stunden sind alle Calciumhydrosilikat-Körner durch C-S-H umhüllt. Die Porenräume zwischen den Körnern werden immer feiner unterteilt, bis die Probe nach 7 Tagen bei der gezeigten Vergrößerung bereits ein keramisches Aussehen zeigt. Falls dem System weitere hydraulisch reagierende Stoffe wie Hüttensand zugeführt werden, können zusätzliche Nebenphasen entstehen.

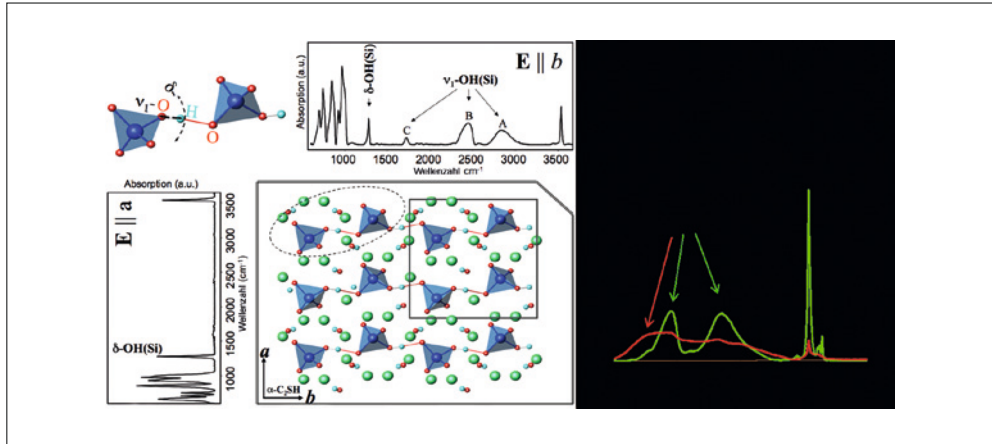


Abb. 4 Polarisierte MIR-Spektroskopie-Messungen (*links und oben*) an einem Einkristall von α - $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ (*Mitte*) zeigt in Wasserstoffbrücken angeordnete OH II b (GARBEV et al. 2008). In einer technischen Probe (*rechts*, grünes Spektrum) sind neben α - $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ (α) geringe Spuren Jaffeit (J) und Portlandit (P) vorhanden. Nach gemeinsamem Vermahlen mit einem SiO_2 -Träger liegen ungeordnete OH-Gruppen vor (*rechts*, rote Kurve; BEUCHLE et al. 2007, modifiziert).

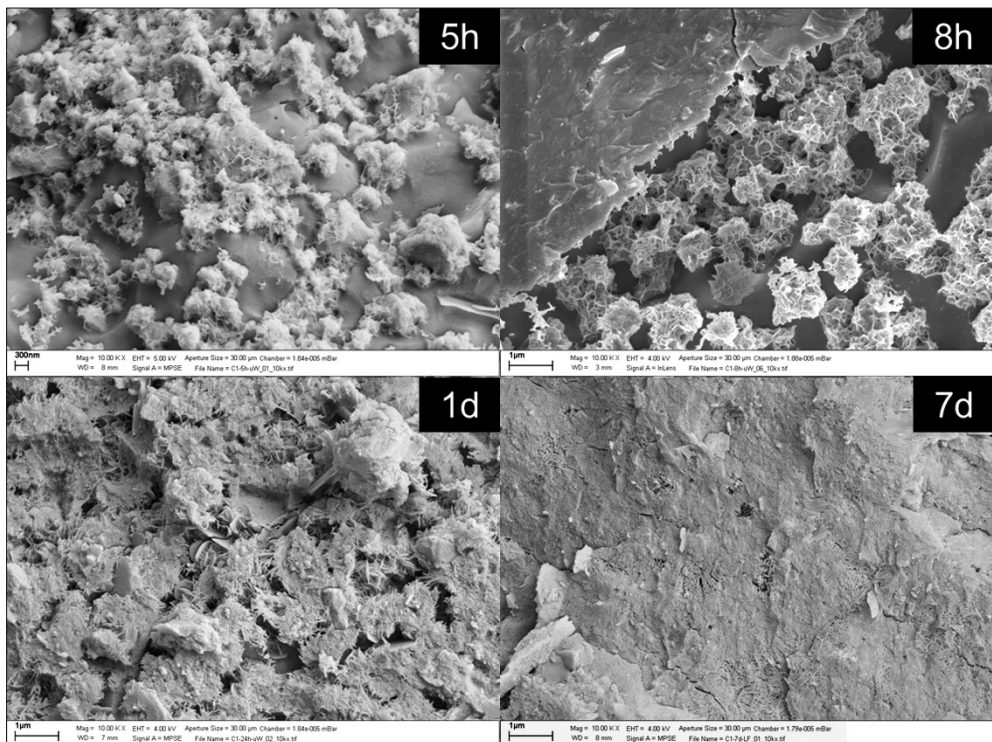


Abb. 5 Hydratation von Celitement nach 5 h, 8 h, 1 Tag und 7 Tagen. Die Proben wurden unter Flüssigstickstoff gebrochen und im Elektronenmikroskop untersucht. Nach einigen Stunden (*oben*) sind alle Celitement-Körner durch C-S-H umhüllt. Nach 7 Tagen sind im Bruch nur noch wenige Mikroporen zu erkennen.

3.3 Technische Herstellung von Celitement – einem Calciumhydro-silikat-basierten Bindemittel

Die Herstellung des neuen Bindemittels erfolgt in den drei wesentlichen bereits skizzierten Schritten.

Zunächst wird aus einem Teil der Rohstoffe ein Rohmehl zur hydrothermalen Herstellung eines Vorprodukts wie z. B. $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ hergestellt. Dazu werden die eingesetzten Rohstoffe Kalk und Sand bzw. Ton gemischt, gemahlen und getrocknet. Anschließend wird das so erzeugte Rohmehl, analog zum bisherigen Zementprozess, thermisch entsäuert. Der Anteil an CaO im entsäuerten Rohmehl ist variabel, beträgt aber maximal 60 Gew. %.

Im zweiten Schritt wird aus dem Rohmehl unter ständigem Rühren und in Anwesenheit von Wasserdampf das hydrothermale Vorprodukt gekocht. Dazu wird ein Autoklav, wie er z. B. zur Herstellung von Porenbeton oder Kalksandstein üblich ist, unter Sattampf bei etwa 190 °C einige Stunden betrieben (Abb. 6).

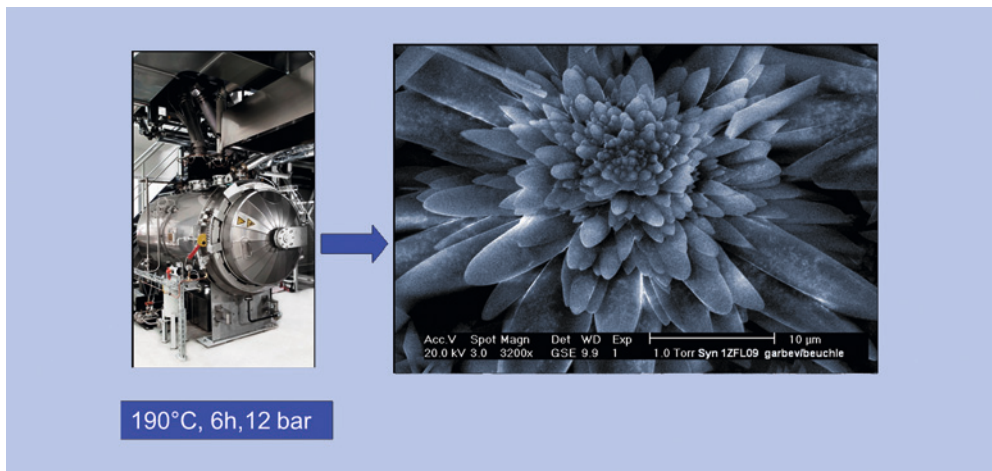


Abb. 6 Technisches Verfahren zur Herstellung von hydraulisch aktivem Calciumhydro-silikat („Celitement“): Entsäuertes Rohmehl wird gemeinsam mit Wasser in einem Autoklaven (links) zu z. B. $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$ (rechts) umgesetzt.

In einem dritten Schritt werden das hydrothermale Vorprodukt und ein weiterer silikatischer Rohstoff, z. B. Sand oder Glas, zu etwa gleichen Teilen miteinander vermahlen. Dabei wird das hydrothermale Produkt aktiviert (Abb. 7). Das Calciumhydro-silikat lagert sich adhäsiv an die Zuschlagstoffe an und wird im mechanischen Kontakt unter Teilentwässerung zu einer Schale aus jetzt hydraulisch reaktivem Calciumhydro-silikat umgewandelt. Wird das fertige Produkt mit Wasser versetzt, reagiert es ausschließlich zu C-S-H.

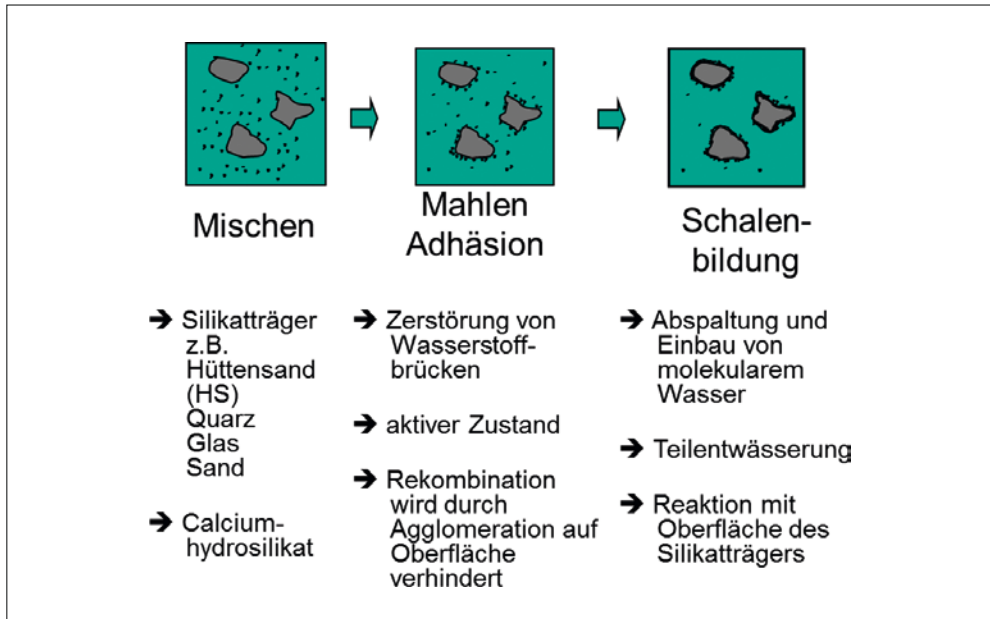
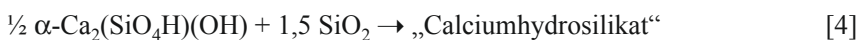
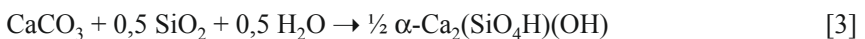


Abb. 7 Technisches Verfahren zur Herstellung von hydraulisch aktivem Calciumhydro-silikat („Celitement“): Calciumhydro-silikat, z. B. $\alpha\text{-Ca}_2(\text{SiO}_4\text{H})(\text{OH})$, wird gemeinsam mit einem Silikatträger in einer Mühle zu dem neuen aus Kern und Schale aufgebauten Binder umgesetzt.

3.4 Stoffbilanz, spezifischer Energiebedarf und spezifische CO_2 -Emission, Eigenschaften

Vereinfacht werden zur Herstellung von Celitement damit 1 Teil Kalk, 2 Teile Sand (SiO_2) und $\frac{1}{2}$ H_2O benötigt. Kalk und $\frac{1}{2}$ Teil Sand werden bei ca. 1000°C unter Freisetzung von 1 Teil CO_2 entsäuert und hydrothermal bei ca. 190°C in ein Vorprodukt umgewandelt (Gleichung [3]). 1,5 weitere Teile Sand werden gemeinsam mit dem Vorprodukt vermahlen. Es entsteht 1 Teil Calciumhydro-silikat (Gleichung [4]). Die Reaktion mit Wasser ergibt eine vollständige Umsetzung zu C-S-H (Gleichung [5]). „Ein“ Teil des eingesetzten Sandes bleibt im Produkt als Füllstoff vorhanden:



Der spezifische Energiebedarf zur Herstellung von Celitement lässt sich zum einen thermodynamisch abschätzen (Abb. 8, STEMMERMANN et al. 2011). Je nach gewählter Zusammensetzung ist damit bei einem theoretischen Wirkungsgrad des Syntheseprozesses von 100% eine Energieeinsparung um mehr als zwei Drittel möglich. Für einen direkten Vergleich mit der aktuellen Herstellungstechnologie kann diese Größe allerdings nur als Hinweis auf ein Potential dienen.

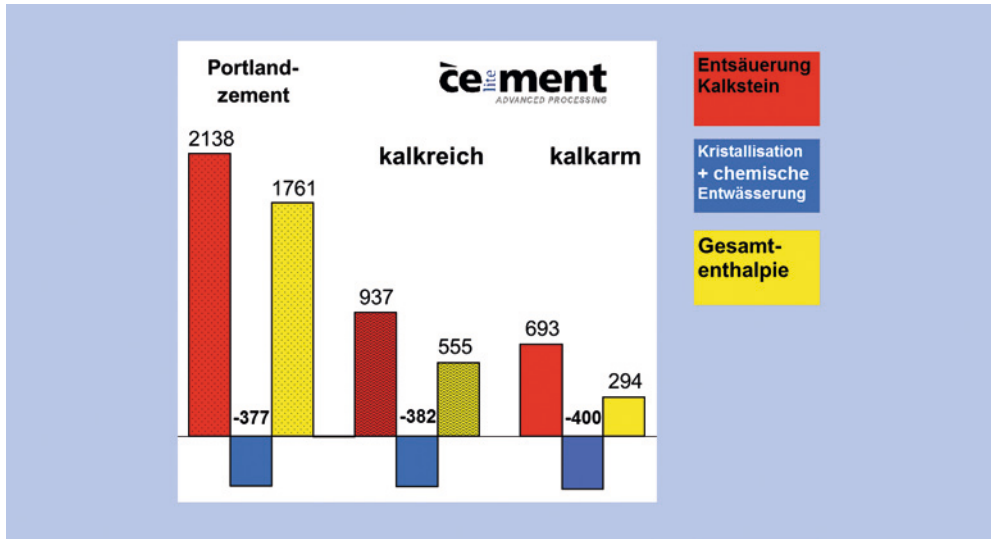


Abb. 8 Bildungsenthalpie von Zementklinker (*links*) und Celitement (*rechts*) pro Kilogramm aus den Rohstoffen. Für Celitement wurden Quarz und Kalkstein als Rohstoffe eingesetzt (STEMMERMANN et al. 2011). Die Energiebilanz und die CO_2 -Freisetzung aus den Rohstoffen werden von der Entsäuerung des Kalks dominiert.

Letztlich entscheidend ist der über den gesamten Herstellungsprozess auftretende Energieverbrauch. Unter konservativer Annahme der großtechnisch erzielbaren Wirkungsgrade und des aktuell verfügbaren technologischen Reifegrads erscheint eine Senkung des Gesamtenergieverbrauchs um etwa 30–50% realisierbar.

Kritisch auf diesem Pfad ist der elektrische Energieverbrauch speziell bei der Mahlung, der mit dem Faktor 2 gegenüber heutigen Systemen angesetzt wurde. Der thermische Energieeinsatz lässt sich dagegen deutlicher reduzieren, falls der *Scale-up* auf Großanlagen gelingt.

Auf Basis des spezifischen Energieverbrauchs und der eingesetzten Energieform wurde der spezifische CO_2 -Ausstoß der neuen Technologie abgeschätzt (Abb. 9). Eine Reduktion um 50% oder mehr ist je nach Zusammensetzung des Produkts erreichbar.

Celimente zeichnen sich nach bisherigen Untersuchungen durch eine hohe Dichtigkeit, eine niedrige Porosität und eine geringe Schwindung bei vergleichbarer Festigkeit wie konventionelle Zemente aus. Die geringe Permeabilität ist eine Voraussetzung für den Einsatz von Stahl als Armierung in Stahlbetonformulierungen. Das Ca/Si-Verhältnis in den Celimenten ist variabel – in jedem Fall aber so hoch, dass Stahl passiviert wird. Zu bewehrten Betonen liegen allerdings bisher noch keine ausreichenden Erfahrungen vor.

Aktuell können Celimente in einer Pilotanlage mit einer Auslegung von 100 kg pro Tag als Vorprodukt hergestellt werden. Die Aktivierung in einer Mühle erfolgt noch in kg-Chargen oder in Fremdmahlungen. Mitte 2013 wird eine kontinuierliche Mahlanlage in Betrieb gehen, so dass der Durchsatz bis zum fertigen Produkt ca. 200 kg/Tag betragen kann. Da Calciumhydrosilikat-basierte Zemente aus den gleichen Rohstoffen wie konventioneller Zement hergestellt werden, ist eine Integration in ein konventionelles Zementwerk denk-

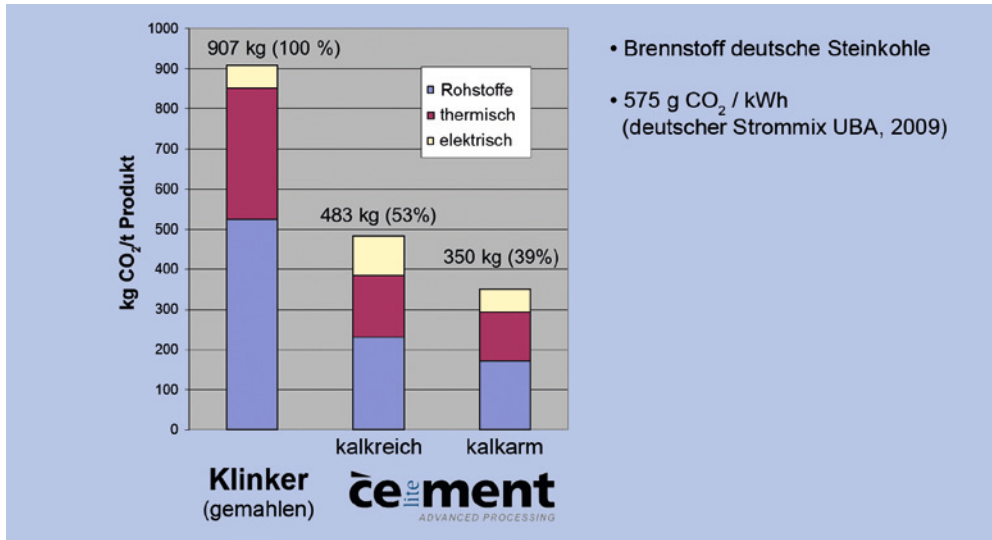


Abb. 9 Rohstoffliche, thermische und aus der Nutzung von Strom stammende Freisetzung von CO₂ je kg einer calciumreichen bzw. calciumarmen „Celitement“-Variante. Zum Vergleich Zementklinker (aus STEMMERMANN et al. 2011).

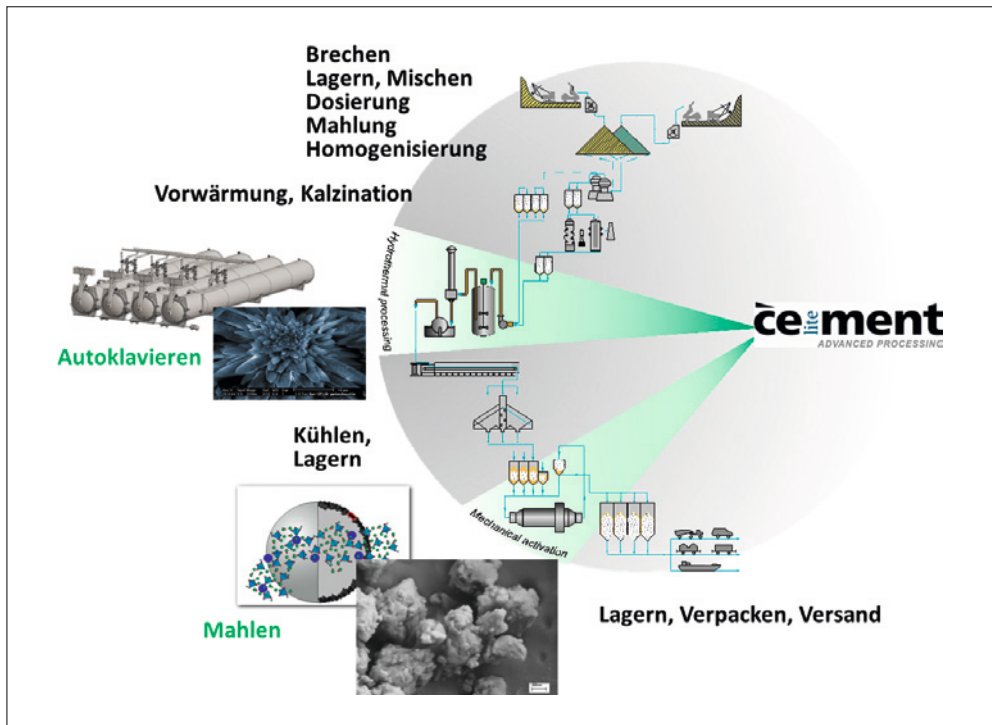


Abb. 10 Konzept einer „Celitement“-Produktionsanlage. Drehrohr und Vorwärmerturm sind durch eine Ofenanlage zur Kalzination des Rohmehls und mehrere Autoklaven ersetzt. Rohstoffe und weitere Einrichtungen können weiter genutzt werden.

bar (Abb. 10). Nach der Mischung und Vermahlung eines Teilstroms der Rohstoffe erfolgt in einem solchen Anlagenkonzept die Kalzination zu einem Heißmehl, analog zu konventionellen Zementwerken. Das Heißmehl wird in Autoklaven umgesetzt, die mit Abwärme der Kalzination betrieben werden können. Für die Vermahlung und Aktivierung können wahrscheinlich ähnliche Mühlen eingesetzt werden, wie sie zur Kinkermahlung üblich sind.

4. Der nächste Schritt – integriert effiziente Baustofftechnologien

Die effiziente Herstellung von Baustoffen bzw. im speziellen Beispiel von Zement löst allerdings noch nicht die wesentlich anspruchsvollere Aufgabe, eine effiziente Nutzung und ein Recycling von Gebäuden zu ermöglichen. Zu diesem Zweck müssen die heute meist nur durch nachgeschaltete Baustofftechnologien erzielbaren Eigenschaften eines Bauteils bzw. letztlich eines Gebäudes möglichst ohne nachgeschaltete Maßnahmen erreicht werden. Eine solche aus der Herstellung des Baustoffs bzw. Bauteils, der Errichtung des Gebäudes, der Nutzung und dem Recycling bestehende Baustofftechnologie wird im Folgenden als „Integriert effiziente Baustofftechnologie“ bezeichnet. Eine vergleichbare Entwicklung erfolgte auf dem Gebiet der Umwelttechnik, wo zunächst Umweltschutz durch nachgeschaltete Technologien zur Vermeidung von Umweltschäden im Vordergrund stand. Langfristig wurde oft der eigentliche Produktionsprozess im Sinne einer integrierten Umwelttechnik so umgestellt, dass die Schadstoffe möglichst gar nicht erst entstehen können (COENEN et al. 1995). Eine integriert effiziente Baustofftechnologie zeichnet sich daher durch folgende Merkmale aus:

- Sparsamer Umgang mit bzw. verringerter Einsatz von Energie und stofflichen Ressourcen im Produktionsprozess unter besonderer Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten;
- möglichst abfallfreie Produktion;
- keine umweltschädlichen Einsatzstoffe;
- keine umweltschädlichen Produkte;
- sparsamer Umgang mit Energie während der Nutzungsphase, hohe Dauerhaftigkeit, einfach zu reparieren bzw. an geänderte Nutzerwünsche anpassbar;
- weitgehender Verzicht auf nachgeschaltete Technologien;
- integrierte Betrachtung über alle Lebensphasen, Massen und Energieströme;
- stoffliches Recycling.

Auch für eine integriert effiziente Baustofftechnologie ist wiederum Beton die zentrale Komponente. Die Herstellung von Betonbauwerken erfordert neben Zement und den damit assoziierten Ressourcen enorme Mengen Stahl, welche die notwendige Zug- und Biegezugfestigkeit gewährleisten (ca. 10% der Stahlproduktion in Deutschland gehen als Bewehrungsstahl in den Betonbau) sowie mineralische Rohstoffe als Zuschlag. Die zur Herstellung eines Stahlbetonbauteils eingesetzte Energie („graue Energie“) stammt etwa zur Hälfte aus Zement, 35% werden der Stahlherstellung zugeordnet, 15% werden für die Konstruktion benötigt. Auch der Einsatz der Ressource Stahl sollte daher langfristig durch die Entwicklung ökonomisch und ökologisch günstiger, z. B. mineralischer, Substitute reduziert werden. Am Ende dieser Entwicklung könnte ein mineralisch bewehrter Beton

stehen, der in Konstruktion und Nutzung enorm flexibel eingesetzt werden kann und bei reduziertem Gewicht eine hohe Festigkeit und Dauerhaftigkeit besitzt. In Form von Textilbeton steht bereits ein möglicher, allerdings nicht allgemein nutzbarer und noch zu teurer Ansatz zur Verfügung.

Während der Nutzungsphase werden Betone heute durch nachgeschaltete Technologien wie Wärmedämmverbundsysteme (meist auf Erdölbasis hergestellt) klimaverträglich gemacht. Die eingesetzten Mengen an mineralischen, metallischen und organischen Rohstoffen sind bei global weiter steigender Industrialisierung bereits mittelfristig als kritisch anzusehen und überwiegend nicht recyclefähig. Dies drückt sich auch in steigenden Investitionskosten aus. Speziell für eine günstige Wärmedämmung wäre daher eine Integration in die mineralischen Baustofftechnologien entscheidend, um über eine Kostenreduktion den globalen Einsatz solcher Technologien zu forcieren. Letztlich sollen Leistungsfähigkeit, Ressourcenverbrauch und Kosten entkoppelt werden.

Integriert effiziente Betontechnologien müssen also den gesamten Lebenszyklus adressieren. Ziel sind Infrastrukturbauwerke und Gebäudehüllen, die höchste Anforderungen an Standfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Wärmedämmung, Feuchtigkeitsregulierung, Feuer-sicherheit usw. unter weitgehendem Verzicht auf den Einsatz organischer und metallischer Ressourcen erfüllen. Dabei ist die Integration von hochwertigem Recycling Bestandteil des Gebäudekonzepts.

5. Ein Programm für integriert effiziente mineralische Baustofftechnologien

5.1 Forschungsfeld mineralische Baustoffe

Forschung an mineralischen Baustoffen und daraus erstellten Bauteilen wird heute vorwiegend an Universitäten, meist isoliert in einem Fachbereich, oft den Fakultäten für Bauingenieurwesen, seltener auch von Mineralogen und Chemikern bearbeitet. Wesentliche Aufgaben sind Lehre, Forschung und Entwicklung für Unternehmen sowie Qualitätssicherung. Auch andere staatliche Forschungseinrichtungen (Materialprüfungsanstalten usw.) sind vorwiegend im Bereich Qualitätssicherung tätig. Zementgebundene Baustoffe werden meist empirisch durch Versuch und Irrtum optimiert. Kriterium ist dabei das makroskopische Versagen im Versuch. Die Ableitung allgemein gültiger Theorien ist selten möglich, das Vorgehen ist sehr zeitaufwändig, teuer und wenig effizient.

Die Dominanz anwendungsbezogener und kundenorientierter Forschung und Entwicklung ist dem komplexen Umfeld aus Zulassung und normativen Anforderungen beim Bauen sowie dem extremen Kosten- und Zeitdruck geschuldet. Radikalere Innovationen sind nahezu unmöglich. Neben dem hohen finanziellen Aufwand und Risiko sind es insbesondere die unkalkulierbaren Abhängigkeiten von konjunkturellen Entwicklungen, Normungsausschüssen, nationaler und europäischer Politik, die strategische Neuorientierungen blockieren. Materialentwicklung hin zu extremer Leistungsfähigkeit erfolgt nur für ein schmales Marktsegment – wobei ein stark steigender Ressourceneinsatz (Additive, Karbonfasern, Harze, Microsilica usw.) typisch ist.

Die Masse der mineralischen Baustoffe steht in einem rein preisdominierten Wettbewerb. Für eine verbesserte Qualität genormter Produkte ist am Markt kein Preisaufschlag durchsetzbar. Dagegen können die Kosten durch die Verwertung von Reststoffen

aus anderen Industriezweigen, insbesondere aus der Energieerzeugung und der Stahlherstellung, aber auch von Sekundärbrennstoffen (z. B. Altreifen), stark gesenkt werden. Da sich die Qualität und Menge der am Markt verfügbaren Reststoffe durch die Unternehmen wenig beeinflussen lässt, steht die Qualitätssicherung und das ökonomisch vorteilhafte Management von Stoffströmen im Vordergrund.

Dies zeigt sich auch darin, dass die Aufwendungen für Forschung bei Großunternehmen relativ klein sind. Die Masse der Innovationen ist inkrementell. Da sich die Forschung bisher nur Bindemittelsysteme vorstellen kann, die die Basiskomponente Zementklinker in irgendeiner Form berücksichtigen, wurde auch wenig Forschungsbedarf für die Grundlagen gesehen. Zusätzlich wurden erst in den letzten 20 Jahren meist sehr aufwändige *High-end*-Analysemethoden entwickelt, die Grundlagenforschung auf der Basis eines tieferen Verständnisses in vielen Bereichen überhaupt erst möglich machen.

Für die strategische Neuorientierung ist von Bedeutung, dass mehrere Weltfirmen im Bereich Zementherstellung, Bauchemikalien und Bauunternehmen ihren Hauptsitz in Deutschland haben.

5.2 Entwicklung effizienter Baustofftechnologien

Über die bisherigen Entwicklungen hinaus muss die Herstellung, Nutzung und Verwertung von Beton und anderen Massenbaustoffen im Sinne einer integriert effizienten Baustofftechnologie optimiert werden. Hohe Priorität besitzen dabei Ansätze, die es ermöglichen, die Wärmedämmfunktion heutiger kompositen Materialien zu integrieren. Dazu ist ein interdisziplinärer Ansatz von Materialforschung im Nano- und Mikrobereich bis hin zur Bonttechnologie notwendig.

Die Vision einer integriert effizienten Baustofftechnologie ist speziell für die öffentliche Hand von höchstem Interesse. Zum einen kann sie politisch ein zentrales Mittel sein, um den Energie- und Rohstoffverbrauch auf ein nachhaltiges Maß zurückzuführen. Zum anderen verspricht sie, die Leistungsfähigkeit unserer Infrastruktur bei langfristig sinkenden Kosten zu verbessern. Außerdem sind auch die Einrichtungen, die eine solche Vision umzusetzen könnten weitgehend in öffentlicher Hand. Staatliche Universitäten und Forschungsinstitute besitzen das *Know how*, entsprechende Lösungen zu entwickeln, wenn ihre Fähigkeiten gebündelt werden. Dazu sind skalenübergreifende, naturwissenschaftlich begründete Modelle vom atomaren Maßstab bis hin zur Statik notwendig.

Diese Modelle müssen mit Hochleistungsanalytik (z. B. mit synchrotrongestützten Methoden) validiert werden. Eine solche *grundlagenbasierte Entwicklung von Baustofftechnologien* markiert einen methodischen Durchbruch, der entscheidend schnellere Innovationssprünge erlauben wird. Die wissenschaftliche Zusammenarbeit zwischen grundlagenorientierter Forschung an anorganischen Materialien, anwendungsorientierter Forschung und systemanalytischer Begleitung von Bauingenieuren, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern wird helfen, die derzeit bestehende Lücke im Transfer naturwissenschaftlicher Erkenntnisse in die Anwendung zu überbrücken.

Ein Forschungsverbund, der mineralische Baustoffforschung von den Grundlagen bis zur Anwendung als Verbundforschung mit dem Fokus auf eine integrierte Baustofftechnologie bearbeitet, existiert bisher weder international noch national. In ersten Ansätzen zeichnet sich die Entstehung solcher Verbünde aber ab. Am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) wurde mit **CSHub** ein Verbund zur Grundlagenforschung und Anwen-

dungsentwicklung an bestehenden Systemen gegründet, der sich allerdings noch im Aufbau befindet (<http://web.mit.edu/cshub/about/index.html>).

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) plant, gemeinsam mit Partnern einen vergleichbaren Verbund als nationales Zentrum für mineralische Baustofftechnologie zu gründen, das insbesondere Grundlagen im Bereich Strukturforschung abdeckt. Das KIT besitzt mit seiner für die Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft typischen exzellenten analytischen Ausstattung (ANKA, KMNF, MPA Karlsruhe)² und dem im Baubereich traditionell forschungsstarken Universitätsteil einzigartige Voraussetzungen, um dieses Themenfeld langfristig zu bearbeiten. Die Komplexität des Problems erfordert die Zusammenarbeit unterschiedlichster Disziplinen und Fakultäten. Von zentraler Bedeutung sind z. B. die Systemanalyse, ökonomische Aspekte und die Geo- und Umweltwissenschaften.

Angewandte Forschung an mineralischen Baustoffen mit Bezug zur Ressourceneffizienz wird in verschiedenen aktuellen Forschungsprogrammen auf europäischer und nationaler Ebene durchgeführt.³ In Europa erfolgt im Netzwerk „**Nanocem**“ (<http://www.nanocem.org/>) auch reine Grundlagenforschung im Kontext des bestehenden Systems.

6. Von der Invention zur Innovation – Die Rolle der Forschungsförderung

Wie schon dargestellt, werden die heute gestiegenen Anforderungen an die Eigenschaften von Bauteilen meist nur durch nachgeschaltete Baustofftechnologien erzielt. Doch selbst wenn integrierte Technologien zur Verfügung stünden, gäbe es noch lange keinen Markt für diese Produkte, da verschiedene Innovationshemmnisse bestehen. Wird unter Innovation Invention und Markteintritt verstanden, wird die Innovationsgeschwindigkeit im Baustoffbereich besonders durch drei zentrale Probleme limitiert: die hohe Regulungsdichte, die langen Zulassungszeiträume und die Marktferne – der Endverbraucher hat zu dem von ihm „bewohnten“ Produkt selten einen Bezug.

Ein wesentliches Kennzeichen des Bauwesens ist die Verwendung genormter Produkte. Sie basieren auf einem historisch gewachsenen System von präskriptiven Normen, die für funktionale Teile ausschließlich Anforderungen insbesondere stofflicher Art enthalten, die sich nur auf Zementklinker basierte Systeme beziehen. Da es in der Vergangenheit trotz erheblicher Anstrengungen nicht gelungen war, ein dem Zementklinker vergleichbares marktfähiges alternatives Bindemittel zu entwickeln, gilt diese Basis Komponente im „System funktionale Baustoffe“ als unverzichtbar. Somit resultieren auch psychologische Barrieren für Innovationen. Präskriptive Normen sind somit Eintrittsbarrieren für Bauprodukte, die auf alternativen Bindemittelsystemen basieren.

Der Prüf- und Zertifizierungsaufwand selbst inkrementeller Innovationen gestaltet sich bisher extrem langwierig. Als ein Beispiel für die Trägheit des Innovationssystems kann die Markteinführung von Portlandkalksteinzementen angeführt werden, die einen fast 20-jährigen Weg von den ersten Tests über die Zulassung bis in die Norm hinter sich haben

2 ANKA – Angströmquelle Karlsruhe (Synchrotronstrahlungslabor), KMNF – Karlsruhe Nano Mikro Facility, MPA – Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe.

3 Als Quellen EU: A Resource-Efficient Europe: Building Materials Embodied Energy; National: Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes), Federführung: BMU; BMBF: Ressourceneffizienz R2, DFG: SPP Leicht bauen mit Beton.

(MANN et al. 2001). Nur mit intensivem Marketing gelang es den Herstellern, die Kunden von der Qualität der Zemente zu überzeugen. Diese Zurückhaltung ist auch beim Endverbraucher anzutreffen, der für seine Investition die größtmögliche Lebensdauer seines Bauwerks möchte und gegenüber „Experimenten“ mit neuen Baustoffen wenig aufgeschlossen ist. Erschwerend kommt hinzu, dass allenfalls in Ansätzen eine Transparenz und damit Wissen über verwendete Baustoffe und Innovationen beim Endverbraucher vorhanden ist.

Ein wichtiger Gesichtspunkt betrifft die Grundlagenforschung im Baustoff- und Bindemittelbereich, die als sehr aufwändig einzuschätzen ist. Gleichzeitig stehen Hersteller im preisdominierten Wettbewerb. Der extreme Kostendruck und die Dominanz performance-bezogener und dabei kundenorientierter Forschung und Entwicklung verhindern nahezu radikalere Innovationen. Die existierenden Förderprogramme sind zudem zu unspezifisch auf allgemeine Verbesserungen ausgerichtet und adressieren integrative Ansätze z. B. zur gleichzeitigen Reduktion von Energie-, Ressourcen und Kosten nicht. Radikalere Innovationen mit aufwändigen Entwicklungs- und Prüfverfahren, die mit langen Laufzeiten einhergehen, sind in den meisten Förderprogrammen nicht vorgesehen. Nötig ist eine spezifische Ausrichtung mit klaren Prioritäten auf die Massenbaustoffe bzw. ihre Schlüsselkomponenten. Andere diskutierte Instrumente zur Realisierung eines energieoptimierten Bauens und Wohnens wie Energie- und Rohstoffsteuern bzw. Emissionsabgaben und Selbstverpflichtungen der Industrie sind in ihrer Auswirkung kaum planbar und führen eher zur Abwanderung einzelner Industrien als zu erhöhten F+E-Aufwendungen. Um die integrierten Technologien schnell am Markt zu platzieren, wäre vermutlich eine öffentliche Absatzförderung geeignet.

Die skizzierten Entwicklungen sind auch ökonomisch von höchster Relevanz. Zum einen eröffnen sich im In- und Ausland neue Märkte für Baustoffentwickler und -hersteller sowie Anlagenbauer. Der größte Effekt zielt aber auf den Nutzer, d. h. die Bewohner bzw. Eigentümer von Gebäuden ab.

Die dargestellte Komplexität der Markteinführung integrierter Baustofftechnologien macht deutlich, dass insbesondere für radikalere Innovationen erhebliche Barrieren vorhanden sind, deren Überwindung eine frühestmögliche und wohldurchdachte Organisation aller im Prozedere relevanten Instanzen erfordert.

Literatur

- ACHTERNBOSCH, M., KUPSCH, C., NIEKE, E., und SARDEMAN, G.: Klimaschonende Produktion von Zement: eine Utopie? *GAIA* 20/1, 31–40 (2011)
- ACHTERNBOSCH, M., KUPSCH, C., NIEKE, E., and SARDEMAN, G.: Are new magnesia-based cements the future? Part 1: Analysis of former developments. *ZKG International* 2, 64–72 (2012)
- ACHTERNBOSCH, M., KUPSCH, C., NIEKE, E., and SARDEMAN, G.: Are new magnesia-based cements the future? Part 2: Novacem – an assessment of new developments. *ZKG International* 3, 64–72 (2012)
- AKMF (Arbeitskreis Marktforschung des Bundesverbands Deutsche Beton und Fertigteilindustrie e. V., Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. und Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e. V.): Zementverbrauch nach Verwendungsarten und Baubereichen. Berlin Mai (2009) (<http://www.bdzement.de/fileadmin/gruppen/bdz/downloads/mafo/ZV2008.pdf>)
- BEUCHLE, G., GARBEV, K., SCHWEIKE, U., und STEMMERMANN, P.: Einphasiges hydraulisches Bindemittel, Verfahren zu seiner Herstellung und mit diesem Bindemittel hergestellter Baustoff. *DE 10 2007 035 259* (2007)
- BLACK, L., STUMM, A., GARBEV, K., STEMMERMANN, P., HALLAM, K. R., and ALLEN, G. C.: X-ray photoelectron spectroscopy of the cement clinker phases tricalcium silicate and [beta]-dicalcium silicate. *Cement and Concrete Research* 33/10, 1561–1565 (2003)

- BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung): Wohnen und Bauen in Zahlen 2011/2012. Stand Juni 2011. Bonn (2012)
(<http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/89886/publicationFile/65127/wohnen-und-bauen-in-zahlen-2011-2012.pdf>)
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie): Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (2011)
(<http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/6-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>)
- COENEN, R., KLEIN-VIELHAUER, S., und MEYER, R.: TA-Projekt „Umwelttechnik und wirtschaftliche Entwicklung“. Integrierte Umwelttechnik – Chancen erkennen und nutzen. Endbericht. Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin (Herausgeber). Bonn 1995
- GARBEV, K., GASHAROVA, B., BEUCHLE, G., KREISZ, S., and STEMMERMANN, P.: First observation of α - $\text{Ca}_2[\text{SiO}_3(\text{OH})](\text{OH})-\text{Ca}_6[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4](\text{OH})_2$ phase transformation upon thermal treatment in air. *J. Amer. Ceram. Soc.* *91/1*, 263–271 (2008)
- HERZOG, T.: World Greenhouse Gas Emissions in 2005. Washington: World Resource Institute 2009
(http://pdf.wri.org/working_papers/world_greenhouse_gas_emissions_2005.pdf)
- JUENGER, M., WINNEFELD, F., PROVIS, J., and IDEKER, J.: Advances in alternative cementitious binders. *Cem. Concr. Res.* *41*, 1232–1243 (2011)
- MANNS, W., THIELEN, G., und LASKOWSKI, C.: Bewertung der Ergebnisse von Prüfungen zur bauaufsichtlichen Zulassung von Portlandkalksteinzementen. *Betontechnische Berichte 1998–2000*. Hrsg. vom Verein Deutscher Zementwerke e. V. – VDZ, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf (2001)
(http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Betontechnische_Berichte/015-024_Polakazem.pdf)
- MARSH, R. E.: A revised structure for α -dicalcium silicate hydrate. *Acta Cryst.* *C50*, 996–997 (1994)
- STEMMERMANN, P., BEUCHLE, G., GARBEV, K., and SCHWEIKE, U.: Celitement® – A new sustainable hydraulic binder based on calcium hydrosilicates. In: PALOMO, Á., ZARAGOZA, A., and AGÜI, J. (Eds.): Proceedings of the 13th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC) CSIC Eduardo Torroja Institute, 3–8 July 2011, Madrid (2011)
- TAYLOR, H. F. W.: *Cement Chemistry*. London: Academic Press 1990
- VANDEPERRE, L. J., LISKA, M., and AL-TABBAA, A.: Hydration and mechanical properties of magnesia, pulverized fuel ash, and portland cement blends. *J. Materials in Civil Engineering* *20*, 375–383 (2008)
- VAN DEVENTER, J., PROVISA, J., and DUXSON, P.: Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering* *29*, 89–104 (2012)
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e. V.): *Umweltdaten*, Düsseldorf (2011)
http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Umweltdaten/Umweltdaten_2011.pdf
- VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e. V.): *Tätigkeitsbericht 2009–2012*. Düsseldorf (2012)
(http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/TaeB09-12/TaeB_09-12_gesamt.pdf)
- WEIZSÄCKER, E. VON, HARGROVES, K., SMITH, M., DESHA, C., and STASINOPOULOS, P.: *Factor 5: Transforming the Global Economy through 80% Increase in Resource Productivity*. London etc.: Earthscan, UK, and Droemer, Germany 2009

Dr. Peter STEMMERMANN
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Technische Chemie
Postfach 3640
76021 Karlsruhe
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 721 60824391
Fax: +49 721 60824373
E-Mail: Peter.Stemmermann@kit.edu

**Politische und gesellschaftliche
Herausforderungen und Lösungswege
von Problemen des Globalen Wandels**

Herausforderungen globaler gesellschaftlicher Veränderungen

Axel BÖRSCH-SUPAN ML (München)

Mit 10 Abbildungen



Zusammenfassung

Der Beitrag konzentriert sich auf drei miteinander interagierende globale gesellschaftliche Veränderungen: die durch die Globalisierung stärker werdenden Rückkopplungseffekte zwischen weit entfernten Ländern, der Übergang zu einer Wissensgesellschaft und die Alterung der Bevölkerung. Alle diese globalen Entwicklungen verlangen soziale Systeme, die sich schneller und mehr flexibel an Schocks anpassen, als es in früheren Zeiten notwendig war. Nicht alle unserer sozialen Systeme können das leisten. Der Beitrag dekliniert dies an Beispielen des Arbeitsmarktes und der damit verbundenen sozialen Sicherungssysteme in Europa, den USA und China durch, insbesondere am Beispiel der Alterssicherungssysteme. Sie können anpassungsfähig gestaltet werden – oder auch nicht, mit den dann entstehenden Ineffizienzen, einem Verlust an Nachhaltigkeit und großen intra- wie intergenerativen Ungleichheiten.

Abstract

The presentation will focus on three interrelated global societal changes: stronger international feedback effects through globalization, the transition to knowledge societies, and population aging. All three developments require social systems which are able to adapt faster and more flexibly to shocks than in earlier times. Not all of our social systems fulfill this requirement. By the way of example, we show how labor markets and labor-related social support systems, notably public pensions, can be designed to adapt easily – or how they fail to do this, then creating inefficiencies, lack of sustainability and large intra- as well as intergenerational inequalities. Most examples will be taken from Europe, the US, and China.

Die Leopoldina hat uns aufgetragen, über die Herausforderungen globaler gesellschaftlicher Veränderungen zu sprechen. Im Gegensatz zu der geradezu atemberaubenden Entwicklung der Naturwissenschaften und der Technik verändern sich Gesellschaften nur langsam, und die Biologie des Menschen noch langsamer. Man muss sich 150 Jahre zurückversetzen, an den Anfang der industriellen Revolution, um sich zu vergegenwärtigen, welche technischen Möglichkeiten der Mensch sich seitdem erobert hat. Die Welt ist durch die vielen technischen und medizinischen Möglichkeiten auch qualitativ eine ganz andere geworden. Der Mensch als Spezies verändert sich aber in den biologischen Zeiträumen der Evolution, nicht in Dekaden, nicht einmal in wenigen Jahrhunderten. Zwischen der langsamen Entwicklung der Biologie und der rasanten in der Technik steht die menschliche Gesellschaft. Der Veränderungsdruck auf sie ist enorm. Wie wir damit umgehen, wo uns die Anpassung misslingt, und was wir tun können, damit wir als Gesellschaft in besserem Einklang mit der technisch-naturwissenschaftlichen Entwicklung leben, ist – an einigen wenigen ausgewählten Beispielen – Thema dieses Vortrags.

Es sind drei große Entwicklungslinien, die derzeit unsere Gesellschaft verändern: Wir erleben *erstens* durch die technisch möglich gewordene Globalisierung eine sehr viel schnellere und stärkere Rückkopplung zwischen den verschiedenen Ländern dieser Erde. Probleme und Missmanagement in einem Land haben unmittelbare Auswirkungen auf andere Länder, sowohl physisch (vor allem durch die Umwelt) als auch finanziell (vor allem durch die Finanzmärkte). *Zweitens* hören wir auf, vornehmlich mit den Armen und Beinen zu arbeiten, sondern benutzen im Wesentlichen unseren Kopf. Mittlerweile verdienen wir



Abb. 1 Flexible und adaptive technische Systeme: (A) Pontonbrücke in Venedig, (B) Büroturnm in Taipeh und (C) Dach des Olympiastadions in München

auch in Deutschland wesentlich mehr durch wissensbasierte Dienstleistungen als durch unsere Industrieproduktion. Und *drittens* koppeln wir uns zunehmend von den gewohnten biologischen Rahmenbedingungen ab. Die moderne Medizin schafft Leben und Gesundheit, wo und wann es früher undenkbar war: Die Lebenserwartung ist explodiert, nachdem diese Jahrtausende lang stagniert hat, und wir bestimmen die Zahl unserer Nachkommen aufgrund ganz anderer Überlegungen als früher.

Globalisierung, Wissensgesellschaft, demographischer Wandel: All dies erfordert ungeheure Anpassungen unserer Gesellschaft. Nur flexible Systeme können dies leisten. In der Technik sind wir es gewohnt, Dinge so zu bauen, dass sie durch Flexibilität Beanspruchungen schlucken können. Man würde eine Pontonbrücke wie diese in Venedig nie fest bauen: Sie muss sich bewegen können (Abb. 1A). Der Büroturm in Taipeh steht auf einer Erdbebenfalte, kann wie ein Bambusrohr hin und her schwanken und ist trotzdem stabil (Abb. 1B). Das Dach des Olympiastadions in München schließlich ist ein hervorragendes Beispiel für Stabilität durch Flexibilität (Abb. 1C).

Ähnlich flexibel müssten auch unsere gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Systeme auf die Veränderungen Globalisierung, Wissensgesellschaft und demographischer Wandel reagieren. Damit ist es jedoch bei weitem nicht so gut bestellt. Ein Beispiel macht dies deutlich, und es ist zentral dafür, warum wir uns mit dem demographischen Wandel so schwer tun. Abbildung 2 zeigt die Entwicklung der Lebenserwartung in verschiedenen

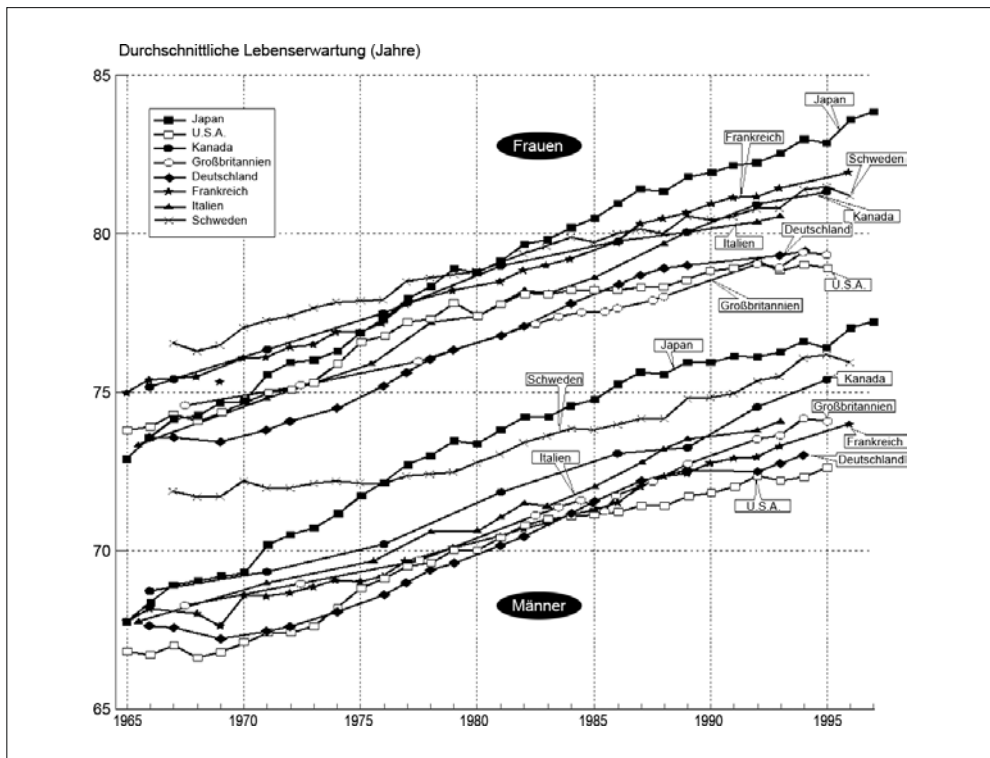


Abb. 2 Entwicklung der Lebenserwartung 1965 bis 2000. Die Werte für Deutschland bis 1990 beziehen sich auf das frühere Westdeutschland. Quelle: Demographic Yearbook, 1996, Special Issue, U.N., etc.

Ländern. Überall steigt sie. Bei den Amerikanern etwas weniger, bei uns etwas mehr. Und dies seit über 40 Jahren fast linear, ca. 1,5 bis 2,5 Jahre pro Dekade, bislang ohne jedes Zeichen für eine kommende Abflachung des Trends.

Abbildung 3 zeigt im Kontrast dazu die Entwicklung der Lebensarbeitszeit, hier am Beispiel der Arbeitsbeteiligung von Männern im Alter von 60 bis unter 65 Jahren. Sie geht im Gegensatz zur Lebenserwartung in den meisten Ländern zurück, in einigen Ländern (z. B. Belgien und Frankreich) dramatisch, in anderen (z. B. Japan und Schweden) deutlich weniger. Insbesondere die europäischen Länder passen sich also nicht der längeren Lebenszeit an, sondern machen das krasse Gegenteil: Sie arbeiten immer weniger – und stauen dann, wenn sie Finanzierungsprobleme in der Rentenversicherung oder im Gesundheitssystem erleben.

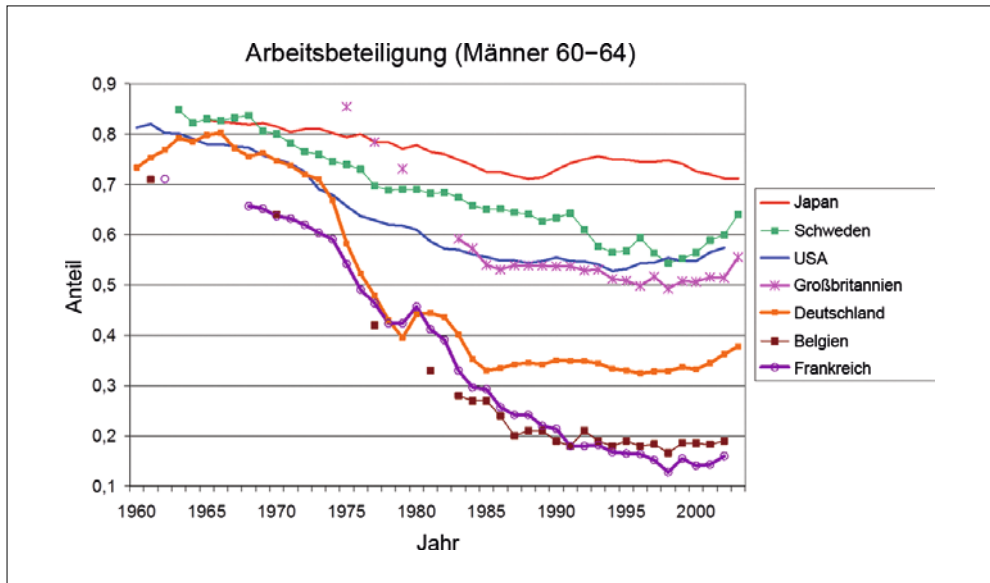


Abb. 3 Entwicklung der Arbeitsbeteiligung Älterer 1960 bis 2005

Als Mitglied der Leopoldina gehört es sich, bei einer solchen Diagnose zunächst zu fragen, wo denn hier die Wissenschaft oder zumindest die wissenschaftliche Politikberatung versagt haben. Zunächst muss man konstatieren, dass gesellschaftliche Systeme, noch nicht einmal wirtschaftliche Systeme, typischerweise nicht von Fachleuten erstellt werden. Das ist in den Naturwissenschaften anders. Das Münchner Olympiastadion hat man nicht von einem Architekten (geschweige denn vom Oberbürgermeister oder vom Gemeinderat) konstruieren lassen, sondern man gab die Berechnungen einem begnadeten Ingenieur. Wenn es um ökonomische Designprobleme geht, ist die Rolle der Wissenschaft jedoch unklar. Lösungen werden eben doch vom Oberbürgermeister bzw. der Arbeitsministerin oder vom Bundestag gemacht und beschlossen, oft auch gegen wissenschaftlich fundierten ökonomischen Rat. Natürlich sind die Probleme in den Sozialwissenschaften deutlich schwieriger als die der Naturwissenschaften und der Technik. In vielen Fällen sind die Lösungen

umstritten – die Finanzkrise 2008/09 war ein trauriges Beispiel. Aber es gibt auch viele Beispiele, in denen sich die Ökonomenzunft völlig einig ist, etwa die Schädlichkeit vergemeinschafteter Schulden und deren fatale Rolle in der Euroschuldenkrise oder die Unabdingbarkeit, Strukturprobleme durch Strukturreformen lösen zu müssen. Hier jedoch führt der Primat der Politik zu Lösungen, die die Flexibilität ökonomisch-gesellschaftlicher Systeme behindert, weil die Politik immer die Übergangskosten struktureller Anpassungsprozesse bei der nächsten Wahl fürchten muss, selbst wenn klar ist, dass langfristig, eben oft sehr langfristig auch die Wähler von der strukturellen Anpassung profitieren. Abbildung 3 ist ein hervorragendes Beispiel: Die Erhöhung des Renteneintrittsalters ist neben Steuererhöhungen oder Schulschließungen so ziemlich das Unpopulärste, was ein Politiker machen kann – auch wenn die meisten Wähler in der langen Frist von den niedrigeren Beitragssätzen finanziell und von einem stabileren Rentensystem sozialpolitisch profitieren würden. Wenn ein französischer Präsident es doch versucht, wird er abgewählt, und sein Nachfolger setzt das Alter wieder herab. Auch in Deutschland ist die Rente mit 67 umstritten, selbst wenn man keinen berühmten Ingenieur benötigt wie beim Münchner Olympiastadion, sondern Sauerländer Grundschulmathematik dazu ausreicht, um auszurechnen, dass der Konsum eines längeren Lebens nicht auf Dauer finanziert werden kann, ohne in Proportion zu diesem längeren Leben auch länger zu arbeiten.

Insgesamt sind unsere Sozialsysteme statisch. Sie schreiben Ansprüche fest, ungeachtet äußerer Rahmenbedingungen, mit keiner oder nur wenig Anpassung an den demographischen Wandel. Sie sind wie eine fest betonierte Pontonbrücke, die sich dem Wasserstand nicht anpassen kann. Feste Ansprüche scheinen bei ruhigem Wetter so angenehm zu sein wie eine wenig schwankende Brücke. Aber solche Sozialsysteme können die Ansprüche nicht durchhalten, wenn sich durch den demographischen Wandel die Zahl der Rentner pro Beitragszahler verdoppeln wird, ebenso wie eine starre Brücke bricht, wenn die Welle zu hoch wird. Die Kunst ist, Flexibilität und Stabilität zu verbinden, anstatt durch mangelnde Flexibilität das System instabil werden zu lassen.

Leider sind nur ganz wenige Rentenversicherungen, die wir in Europa und in der Welt haben, in diesem Sinne nachhaltig. Sie müssten dazu auf die Lebenserwartung ebenso reagieren können wie auf eine geänderte zahlenmäßige Balance zwischen Jüngeren und Älteren. Was kann die Wissenschaft leisten, um diese Anpassungsprozesse flexibler zu gestalten? Was können ganz konkret die Sozial- und Wirtschaftswissenschaften beitragen, die ich heute hier zu vertreten habe? Lassen Sie mich drei Beispiele geben, eines für die Makroebene und zwei für die mikroökonomischen und mikrosoziologischen Details.

Die Nationalökonomie kann gut langfristige Zusammenhänge aufzeigen, die in der politischen Tagesdebatte verloren gehen. Die folgende Sequenz dreier Graphiken macht das deutlich. Abbildung 4 zeigt zunächst die internationale Entwicklung des Altersquotienten, der Schlüsselstatistik für den demographischen Wandel: die Anzahl der über 60-Jährigen pro 20- bis 59-Jährige. Die blauen Säulen zeigen den augenblicklichen Zustand. Hinzu kommen bis 2030 die roten und bis zum Jahr 2050 die gelben Zuwächse. Die Spitzenreiter *in puncto* Alterung sind Japan, Italien, Spanien, Deutschland, Portugal und Griechenland.

Abbildung 5 zeigt die zukünftige Entwicklung der Rentenausgaben bis 2050. Im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten steigen diese in der EU kräftig an. Vom Niveau her liegen Deutschland und vor allem Italien sehr hoch. Besonders auffallend ist jedoch Griechenland, wo die Ausgaben bis auf fast ein Viertel des Bruttonationalprodukts explodieren werden. Abbildung 6 zeigt schließlich die seit der Staatsschuldenkrise bekannten derzei-

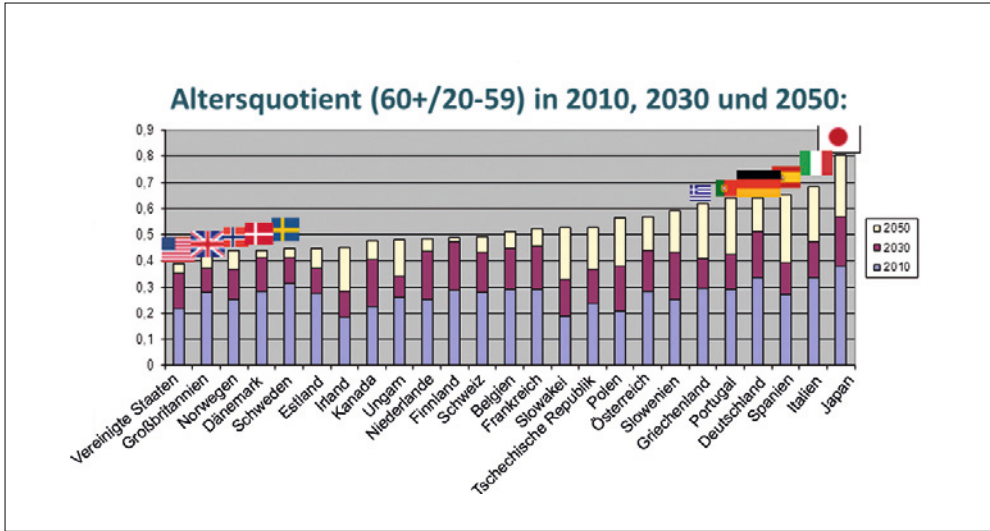


Abb. 4 Anzahl 60-Jährigen und Älteren pro 20- bis 59-Jährige

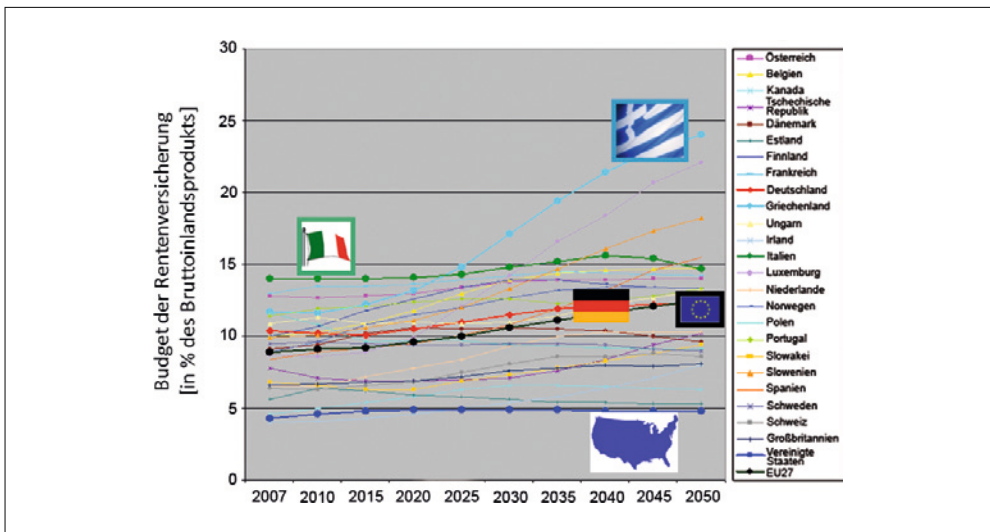


Abb. 5 Entwicklung der Rentenausgaben 2007–2050

tigen Staatsschulden als Anteil des Bruttonettoprodukts, wiederum mit Griechenland als Spitzenreiter bei fast 170 %. Die Hauptaufmerksamkeit in Abbildung 6 sollte jedoch den roten Balken gewidmet werden. Sie übersetzen die Alterung (Abb. 4) und die zukünftigen Kosten der Rentenversicherungen (Abb. 5) in die sogenannten impliziten Staatsschulden, d.h. diejenigen Versprechen der Rentenversicherung, die durch Steuern und Beitragszahlungen auch in der Zukunft nicht gedeckt sind. In fast allen Ländern sind diese sehr hoch,

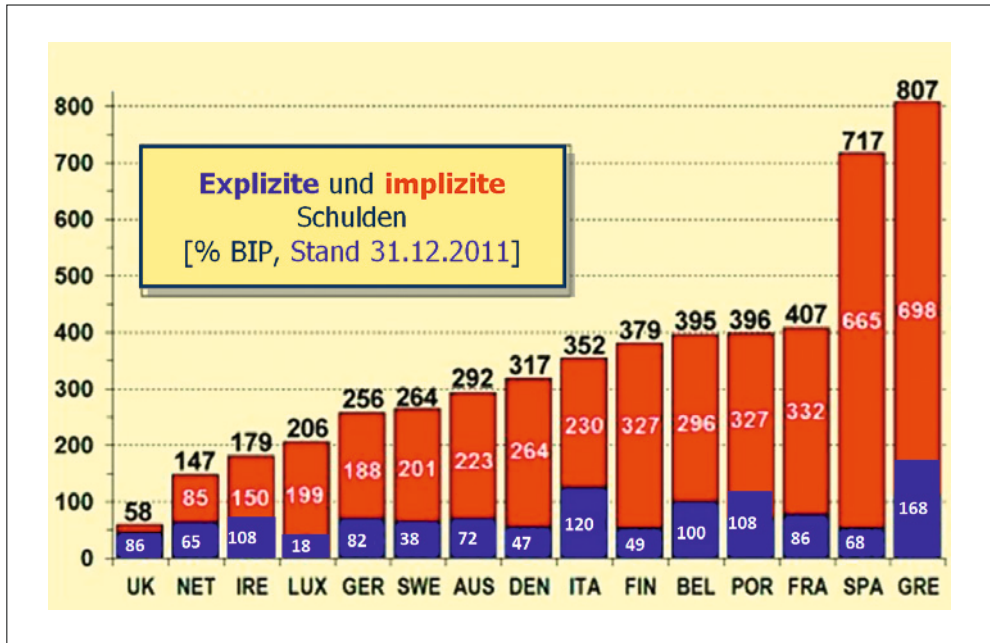


Abb. 6 Die doppelte Schuldenlast

vor allem aber in Spanien und Griechenland, wo sie fast das Siebenfache des Bruttosozialprodukts betragen. Sieben Jahre müssten also alle jungen Griechen und Spanier nur dafür arbeiten, um über ihre schon jetzt bestehenden Steuern und Beträge hinaus die Renten der älteren Generation zu finanzieren. Das wird weder politisch noch wirtschaftlich machbar sein; hier wird der Staat einen Teil explizit durch Staatsschulden finanzieren müssen. Was wir im Augenblick als Euroschuldenkrise sehen, hat also bei weitem nicht nur etwas mit augenblicklichen Problemen oder vergangenem Überziehen der Staatsbudgets zu tun, sondern sehr viel mit den zukünftigen ungelösten Problemen des demographischen Wandels. Sie hängen wie ein Damoklesschwert über den Gesellschaften, die zu viel versprochen und sich zu wenig angepasst haben. Weder Griechenland noch Spanien haben es bislang geschafft, ihre Rentenversicherungen glaubhaft zu reformieren.

Neben dem Aufzeigen der langfristigen makroökonomischen Zusammenhänge können die modernen Wirtschafts- und Sozialwissenschaften mit ihren empirischen Arbeiten die Details der gesellschaftlichen Veränderungen, oft auch die darunter liegenden kausalen Mechanismen aufzeigen. Was die kausale Attribution angeht, ist die Zuordnung von beobachteten Effekten zu den sie auslösenden wirtschafts- und sozialpolitischen Maßnahmen für die wissenschaftliche Politikberatung der Leopoldina besonders interessant, aber auch besonders schwierig. Immer braucht man dazu den Vergleich eines Wirtschafts- und Sozialsystems mit einem anderen, denn nur aus der Verschiedenheit der Eingriffe und der Reaktionen darauf kann man lernen, wie diese gesellschafts-, sozial- und wirtschaftspolitischen Eingriffe funktionieren. Da sich Wirtschafts- und Sozialsysteme in einem Land nur selten dramatisch ändern, bieten sich hier internationale Vergleiche an. Ein Musterbeispiel für diesen Ansatz ist der „Survey of Health, Ageing and

Retirement in Europe (SHARE)“, der 85 000 Personen im Alter 50 und darüber in 20 europäischen Ländern z. T. mehrfach zu gesundheitlichen, ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen befragt hat (Abb. 7). SHARE wird vom *Munich Center for the Economics of Aging* (MEA) im Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik koordiniert und ist eingebettet in ein globales Netzwerk ähnlicher Umfragen u. a. in den USA, Japan, China und Indien.

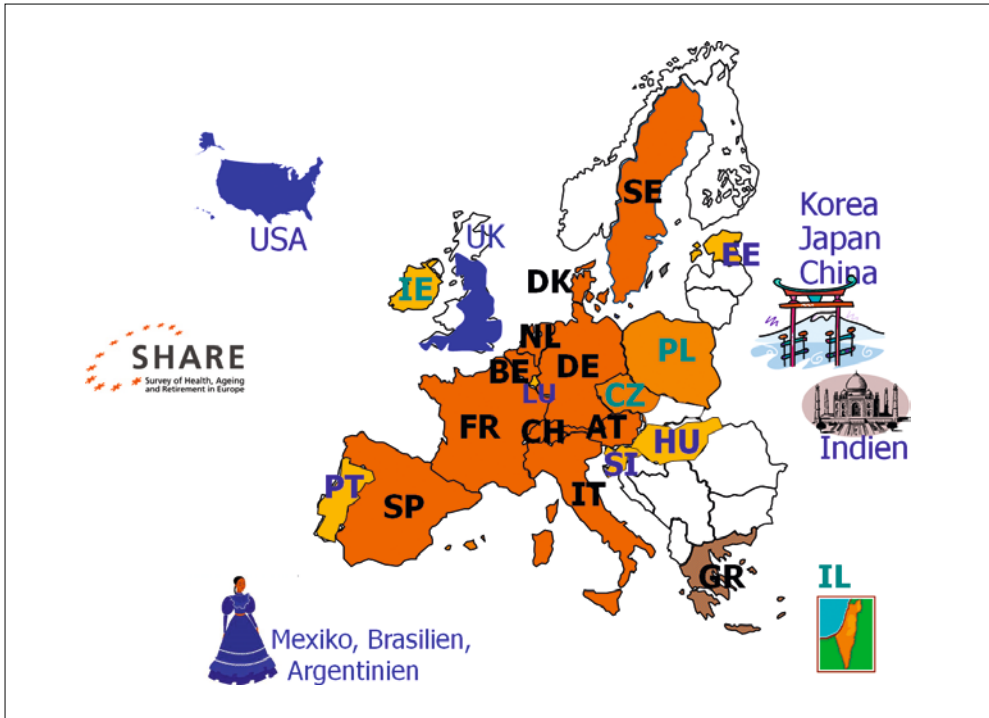


Abb. 7 „Survey of Health, Ageing and Retirement in Europe“ (SHARE)

Wir lernen aus solchen Surveys zum Beispiel, wie komplex das aktuelle Thema der Altersarmut ist. In fast allen Ländern ist die Altersarmut unter Frauen höher als unter Männern. Kaum eine Gesellschaft hat ihr Rentensystem an die geänderten Rollen von Frau und Mann angepasst. In Deutschland ist Altersarmut ein prozentual relativ geringes Problem, jedenfalls nicht zu anderen entwickelten Ländern, und auch nicht relativ zu hoch entwickelten Ländern wie z. B. den Vereinigten Staaten. Griechenland dagegen hat, wie bereits erwähnt, eines der teuersten Rentensysteme der Welt – und dennoch ist es gleichzeitig eines der Länder mit der höchsten Altersarmut. Dies liegt daran, dass in Griechenland Rentenbezieher zum Teil mehr Rente erhalten als ihr vergangener Lohn und es zudem in Griechenland möglich ist, mehrere Renten gleichzeitig zu beziehen. Wer jedoch keine Rente bekommt, ist in Griechenland mittellos. Solche differenzierten Analysen sind ein Produkt der empirischen Sozialforschung mit ihren großen Surveys; sie zeigen den Reformbedarf detailliert auf.

Ein zweites, vielleicht ebenso überraschendes Beispiel für die Aussagen von sozialwissenschaftlichen Mikrodaten ist der Gesundheitszustand in Deutschland. Aus den SHARE-Daten lässt sich errechnen, in welchem Alter durchschnittlich die erste größere Funktionsbehinderung eintritt. Dies wird anhand von 10 Kriterien gemessen, z. B. keine 100 Meter mehr laufen oder nicht mehr einen Treppenabsatz hinaufgehen zu können, ohne eine Pause einzulegen. Deutschland liegt bei diesem Gesundheitsmaß entgegen häufiger vertretener Meinung keineswegs in der Spitzengruppe gesunder Länder, sondern eher am unteren Ende der EU (Abb. 8).

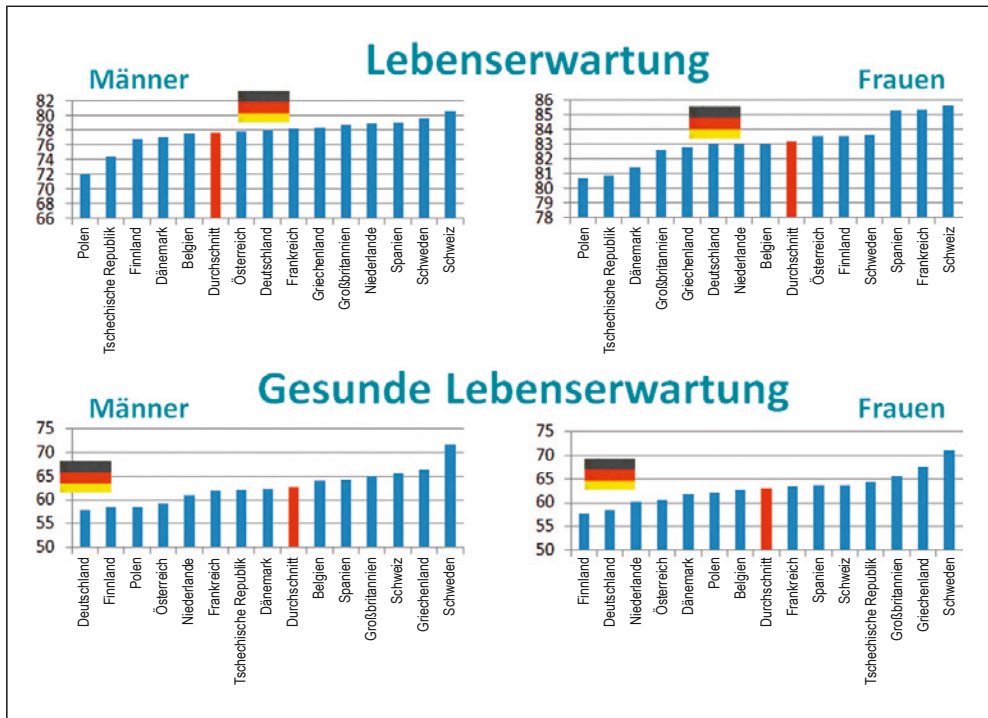


Abb. 8 Gesundheit im internationalen Vergleich

Deutschland hat ein relativ teures Gesundheitssystem, aber die Leistungen sind nicht überdurchschnittlich. In der Bildung sieht das übrigens ähnlich aus. Dies ist durch die PISA- und TIMMS-Studien bekannt geworden. Weniger bekannt ist der aus den SHARE-Daten ersichtliche Zusammenhang zwischen Bildung und Gesundheit. Die detaillierten Daten des SHARE zeigen eine langfristige Kausalkette, die mit dem Bildungsstatus des Elternhauses beginnt, sich in Bildung, Sozialstatus und Einkommen im Arbeitsleben fortsetzt und sich schließlich in der Gesundheit im Alter niederschlägt. Hier ist auch die Brücke zur Altersarmut sichtbar: Zukünftige Altersarmut entsteht, weil wir Menschen haben, die ihr ganzes Leben lang keine ordentliche Bildung bekommen haben, daher schlecht verdienen und zudem im Alter eine überproportional schlechte Gesundheit und somit hohe, oft nur schlecht abgesicherte Krankheitskosten haben.

Der Zusammenhang zwischen Bildung und Gesundheit, insbesondere frühkindlicher Bildung und Gesundheit im Alter, ist in Deutschland besonders stark ausgeprägt. Wir haben sehr wenig intergenerative Mobilität sowohl bei der Bildung als auch bei der Gesundheit, wie wir wiederum aus den SHARE-Daten ersehen können. Vielleicht ist es die wichtigste Lehre aus diesen Daten, dass eine alternde Gesellschaft sich mehr um die Jungen kümmern muss. Hier braut sich auch in Deutschland etwas zusammen, nicht nur in den krisengeschüttelten mediterranen Ländern. Wir haben in Deutschland zu wenig Beachtung der Gesundheit und der Bildung als langfristige Investitionen geschenkt. Der demographische Wandel als große gesellschaftliche Herausforderung bedeutet, wenn wir schon weniger junge Leute haben werden, dann wenigstens diese wenigen gut auszubilden und ihnen ein Fundament für gute Gesundheit bis ins Alter zu legen. Wir haben bislang viel zu wenig verstanden, dass eine alternde Gesellschaft nicht primär eine Gesellschaft Alternder ist, sondern immer noch viele Junge hat, um die man sich ganz besonders kümmern muss.

Der demographische Wandel ist keineswegs auf Deutschland oder Europa beschränkt, sondern eine globale Herausforderung. Lassen Sie mich zum Abschluss etwas zu den bevölkerungsreichsten Ländern dieser Erde, China und Indien, sagen. Gemessen an der absoluten Zahl der über 65-Jährigen wird die Welt nicht etwa vom alternden Europa, sondern von Indien und China dominiert. Wir haben den demographischen Wandel nicht für uns gebucht und müssen darüber graue Haare bekommen, sondern sollten auch bedenken, wie Indien und China mit ihren demographischen Problemen umgehen werden und welche Probleme hier indirekt auf uns zukommen werden. Deutschland hat Ende des 19. Jahrhunderts seine Rentenversicherung eingeführt, als Deutschland zwar schon weit entwickelt war, aber weit weniger alt und reich, als wir es jetzt sind. Wir sind reich geworden und haben gleichzeitig dazu unsere Sozialsysteme aufgebaut, danach werden wir jetzt alt. In China und Indien ist das anders. Beide Länder sind in großen Landesteilen sehr arm. Beide Länder werden rasant alt in dem Sinne, dass die Lebenserwartung ansteigt und die Geburtenrate zurückgeht. Das Ausgangsniveau der beiden Entwicklungen liegt zwar noch weit hinter Europa zurück, die Geschwindigkeit der Veränderung ist jedoch viel höher, daher auch der gesellschaftliche Veränderungsdruck. China und Indien sind Länder, die jetzt schon alt werden, jedoch noch keine funktionierenden flächendeckenden Sozialsysteme haben, weder für die Gesundheitsversorgung und erst recht nicht für eine ausreichende Rente. Die absoluten Zahlen sind beeindruckend: China wird im Jahr 2050 über 350 Millionen über 65-Jährige, und über 100 Millionen über 80-Jährige haben (Abb. 9). Deutschlands Gesamtbevölkerung wird dann bei 75 Millionen liegen. Das Alterungsproblem in China und auch in Indien hat eine völlig andere Dimension als unseres.

Indien hat dank seines hohen Anteils junger Menschen noch das, was sehr graphisch „demographischer Rückenwind“ genannt wird: Es gibt viele junge Leute, die die Wirtschaft vorantreiben. China ist gerade am Übergang, und in Deutschland sind wir schon im „demographischen Gegenwind“ (Abb. 10): Immer mehr der Wirtschaftskraft junger Leute wird benötigt, um Renten und Gesundheitsausgaben zu finanzieren. Derzeit verlassen wir uns sehr auf die Weltwirtschaft, vor allem auf die asiatischen Abnehmerländer. Dies wird schwieriger werden, wenn China und Indien von denjenigen Problemen der Wirtschaft eingeholt werden, die uns in Europa bereits jetzt Kopfschmerzen machen.

Die globale gesellschaftliche Herausforderung des demographischen Wandels ist ein gutes Beispiel für überfällige gesellschaftliche Anpassungen, für die Überprüfung unserer

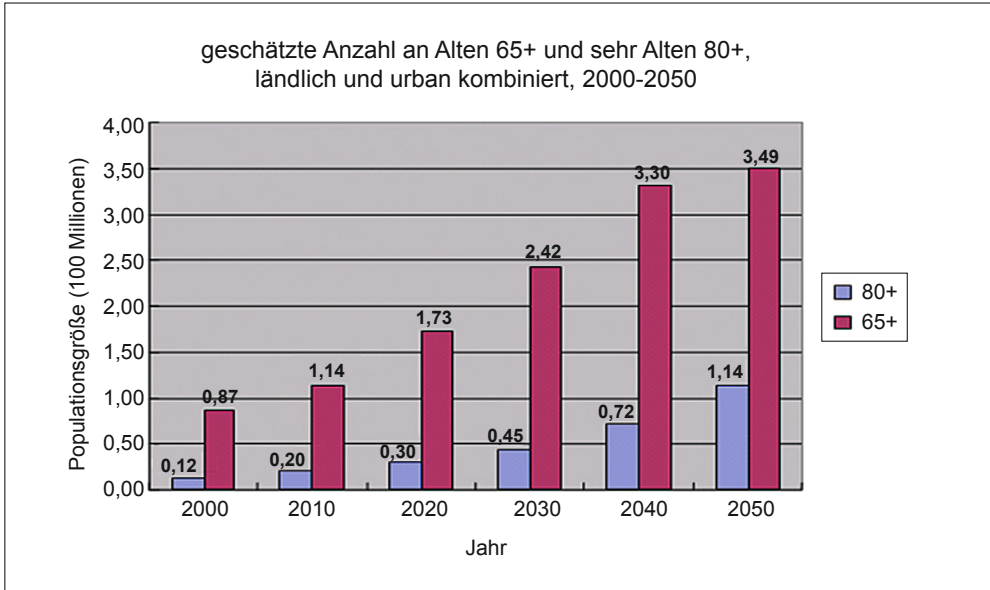


Abb. 9 Demographischer Wandel in China. Leng Yi et al. vorläufige Ergebnisse, Studie in Bearbeitung

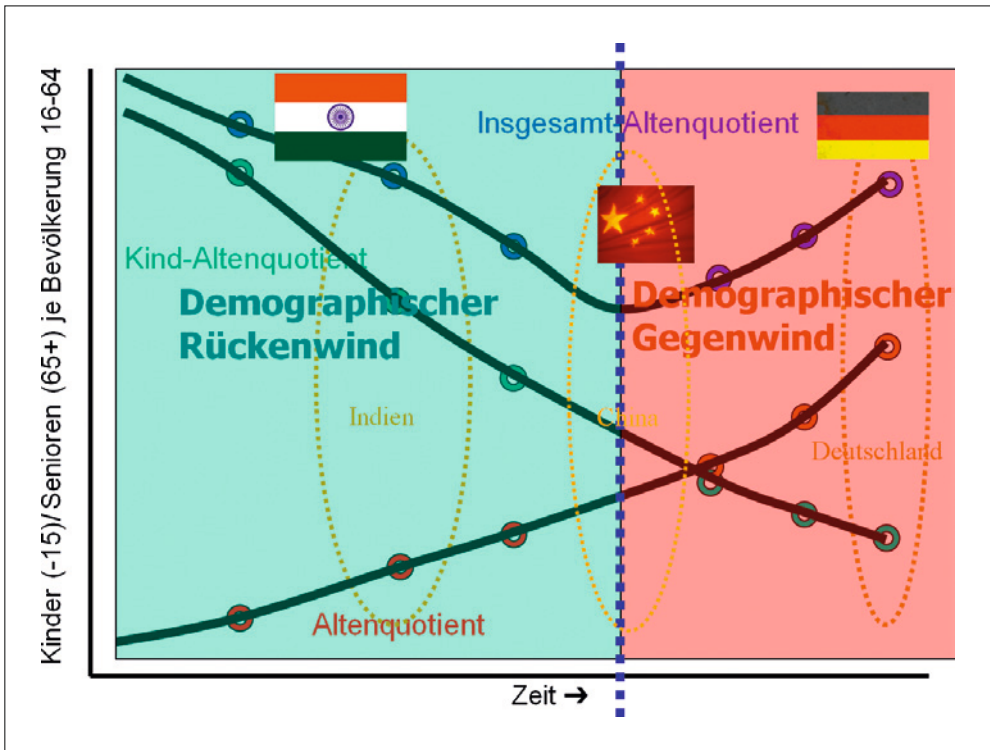


Abb. 10 Demographischer Rücken- und Gegenwind

Institutionen und Regeln, *pars pro toto* und am prominentesten des Rentenalters. Am wichtigsten scheint es mir jedoch zu sein, die Richtung zu ändern, in der wir uns um den demographischen Wandel kümmern. Wir denken zu sehr über die Alten nach, über die Rentensysteme und über die Gesundheitsversorgung derjenigen, die nicht mehr im Arbeitsprozess stehen. Wir vergessen dabei, dass im Jahr 2050 auch in Deutschland die Mehrheit der Bevölkerung immer noch unter 50 Jahre alt sein wird. Wir tun in der politischen Diskussion aber so, als ob es nur noch Rentner gäbe. Wir übersehen, dass ohne Bildung und Gesundheit der Jüngeren das soziale Netz nicht funktionieren kann. Wenn man über die alternde Gesellschaft redet, sollte man also zunächst über ihr Fundament reden, die Jungen – und diese Jungen gesund halten und vor allem gut ausbilden.

Prof. Dr. Axel BÖRSCH-SUPAN
Munich Center for the Economics of Aging (MEA)
im Max-Planck-Institut für Sozialrecht und Sozialpolitik (MPISOC)
Amalienstraße 3
80799 München
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 386020
Fax: +49 89 38602490
E-Mail: axel@boersch-supan.de

Gesundheitspolitische Maßnahmen angesichts der Last chronischer Krankheiten

Johannes SIEGRIST (Düsseldorf)

Mit 5 Abbildungen



Zusammenfassung

Heute bestimmen chronische Krankheiten weitgehend das Spektrum der die Sterblichkeit einer Bevölkerung bestimmenden Leiden, nicht nur in modernen Gesellschaften, sondern zunehmend auch in den wirtschaftlich aufstrebenden Schwellenländern. Im Vordergrund stehen Herz-Kreislauf-Krankheiten, Krebskrankheiten, obstruktive Lungenkrankheiten, Stoffwechselkrankheiten sowie Unfälle und Suizide. Ihre Verbreitung wird von bestimmten sozioökonomischen und soziokulturellen Faktoren mit beeinflusst, insbesondere einem gesundheits-schädigenden Lebensstil sowie materiellen und psychosozialen Benachteiligungen und Belastungen, die sozial ungleich verteilt sind. In allen modernen Gesellschaften, aus denen entsprechende Daten vorliegen, zeigt sich das Verteilungsmuster eines sozialen Gradienten: Je niedriger die soziale Schichtzugehörigkeit einer Gruppe, desto höher ihre Krankheitslast. In zwei Lebensphasen ist dieser Gradient besonders stark ausgeprägt, am Lebensbeginn sowie im jungen und mittleren Erwerbsalter.

Anhand ausgewählter Befunde aus der internationalen epidemiologischen Forschung wird gezeigt, wie der Zusammenhang zwischen sozialer Lage und gesundheitlicher Gefährdung in diesen beiden Lebensphasen erklärt werden kann. Abschließend werden wichtige, aus diesen Erkenntnissen abzuleitende gesundheitspolitische Maßnahmen erörtert, deren konsequente Umsetzung im Sinne einer alle Politikbereiche durchdringenden Gesundheitspolitik nicht nur vermeidbare gesundheitliche Ungleichheiten, sondern die Last chronischer Krankheiten insgesamt in globaler Perspektive zu verringern vermöchte.

Abstract

Chronic diseases are major determinants of the mortality of populations, not only in modern societies, but increasingly so in rapidly developing countries. Prominent causes are cardiovascular diseases, cancers, obstructive pulmonary diseases, metabolic disorders, accidents and suicides. Their distribution is mainly influenced by distinct socioeconomic and sociocultural factors, in particular a health-damaging lifestyle as well as social deprivation and adverse material and psychosocial circumstances. These conditions are unequally distributed across modern societies leaving population groups in lower socioeconomic positions at higher risk. This social gradient of diseases is steepest during two stages of the life course, early childhood as well as early and midlife adulthood.

Based on selected results from international epidemiological investigations major explanations of associations of socioeconomic position with disease risks during these stages of the life course are given. In its final part the contribution discusses important health policy implications of available scientific evidence. Implementing these measures into 'health in all' policies would not only reduce social inequalities in health, but alleviate the overall burden of chronic diseases in a global perspective.

1. Einleitung

Krankheiten kennen keine Grenzen. Sie wandern über Zeiten und Räume hinweg, es sei denn, dass ihrer Ausbreitung durch den Kampf um Prävention und Gesundheitsvorsorge Einhalt geboten wird. Eindrucksvoll zeigt dies die Geschichte der großen Epidemien und Seuchen vergangener Jahrhunderte. Jedoch scheinen diese Wanderungen nicht völlig willkürlich zu verlaufen, sondern bestimmten Mustern zu folgen. Besonders deutlich wird dies angesichts des säkularen Trends, der den Wandel des Krankheitsspektrums in allen entwickelten Gesellschaften seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert kennzeichnet. Dieses als ‚epidemiologische Transition‘ bezeichnete Muster lässt sich so beschreiben, dass die vorherrschende, die Sterblichkeit der Bevölkerung beeinflussende Krankheitslast nicht mehr durch Infektionskrankheiten bestimmt wird, sondern vielmehr durch chronische Krankheiten (SALOMON und MURRAY 2002). Als chronisch werden Krankheiten bezeichnet, die durch eine langfristige Entwicklung sowie durch differentielle Verlaufsformen gekennzeichnet sind und zu deren Behandlung und Verhütung in der Regel keine kausal wirkenden Therapien verfügbar sind. Die Eindämmung von Infektionskrankheiten setzte zwar in gewissem Umfang bereits im Übergang von der vorindustriell-agrarischen zur Industriegesellschaft ein, durch Verbesserung von Hygiene, Ernährung und Bildung (McKEOWN 1982). Allerdings kommt der durch Fortschritte der Medizin wesentlich wirksameren Bekämpfung führender Infektionskrankheiten im Kindes- und frühen Erwachsenenalter im ausgehenden 19. und frühen 20. Jahrhundert die entscheidende Rolle zu. Die Senkung der Säuglings- und Kindersterblichkeit während jener Jahrzehnte trug wesentlich zu einer ersten Phase des demographischen Alterns bei, und mit der Zunahme der Lebenserwartung breiteten sich jene chronischen Krankheiten aus, die in der Regel erst im mittleren oder höheren Lebensalter manifest werden und die nun zunehmend die Sterblichkeit der Bevölkerung bestimmen. Im Vordergrund stehen Herz-Kreislauf-Krankheiten, Krebskrankheiten, obstruktive Lungenkrankheiten, Stoffwechselkrankheiten sowie Unfälle und Suizide.

Man kann dieses Ausbreitungsmuster chronischer Krankheiten nur angemessen verstehen, wenn seine Beeinflussung durch prägende sozioökonomische und soziokulturelle Entwicklungen beachtet wird. So breiten sich beispielsweise mit zunehmendem Wohlstand ernährungsbedingte Erkrankungen aus, und die fortschreitende Technisierung erhöht verkehrsbedingte Unfallrisiken. Mit expandierender Industrialisierung treten arbeitsbedingte Krankheiten und gesundheitliche Gefährdungen infolge von Umweltbelastungen in den Vordergrund, und ein wachsender Leistungsdruck begünstigt den Konsum von Stimmung und Aktivität regulierenden Substanzen und Suchtmitteln, vor allem den Tabakkonsum mit seinen verheerenden Folgen hoher Lungenkrebssterblichkeit (MATHERS und LONCAR 2006). Daher wird die epidemiologische Transition auch als ein Vordringen von ‚Zivilisationskrankheiten‘ bezeichnet, für deren Ausbreitung in erster Linie gesundheitsschädigende ‚Lebensstile‘ verantwortlich gemacht werden.

Nach dem Gesagten ist zu erwarten, dass der skizzierte Wandel des Krankheitspanoramas entwickelter Industriegesellschaften des Westens rasch auf die in einem revolutionären wirtschaftlichen und soziokulturellen Umbruch befindlichen Schwellenländer übergreifen wird. Und in der Tat mehren sich die Anzeichen dafür, dass das Ausbreitungsmuster chronischer Krankheiten von ‚Norden‘ nach ‚Süden‘ in globalem Maßstab bereits heute viel bedeutsamer ist als das – im Zuge wirtschaftlicher Globalisierung keineswegs zu vernachlässigende – Muster eines Imports von Infektionskrankheiten aus rückständigen Ent-

wicklungsländern des Südens in die reicheren Länder des Nordens. So errechnete eine Expertenkommission der Weltgesundheitsorganisation bereits vor einigen Jahren, dass auf die Ausbreitung von Infektionskrankheiten von Süden nach Norden lediglich etwa 30% der weltweit geschätzten Krankheitslast entfallen, während das Übergreifen chronischer Krankheiten von Norden nach Süden für etwa 70% der globalen Krankheitslast verantwortlich ist (MURRAY und LOPEZ 1997). Neuere Trendanalysen bestätigen diesen Befund und unterstreichen zugleich, dass die Mortalität in globalem Maßstab vom früheren (Senkung der Kindersterblichkeit) zum höheren Lebensalter (demographisches Altern) verlagert wird (MATHERS und LONCAR 2006).

Es lohnt sich daher, die Determinanten der Ausbreitung von Zivilisationskrankheiten in westlichen Ländern genauer zu untersuchen, nicht nur, um für die zu ihrer Eindämmung notwendigen gesundheitspolitischen Maßnahmen eine bessere wissenschaftliche Evidenzbasis zu schaffen, sondern auch, um entsprechendes Wissen und Handeln zu präventiven Zwecken den die globale Entwicklung mehr und mehr bestimmenden Schwellenländern zukommen zu lassen.

2. Das Verteilungsmuster von Zivilisationskrankheiten

Am Beispiel der Herz-Kreislauf-Krankheiten, der heute noch in den wirtschaftlich fortschrittlichen westlichen Ländern führenden Todesursache, lässt sich der Wandel des Verteilungsmusters chronischer Krankheiten während des 20. Jahrhunderts besonders eindrucksvoll belegen. In den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts nahm die Häufigkeit dieser Krankheiten in industrialisierten Ländern überall zu, und ihre Ausbreitung konzentrierte sich in stärkerem Maß auf Mitglieder wohlhabender sozialer Schichten. Kalorien- und fettreiche Ernährung, Bewegungsarmut, Übergewicht und damit einhergehender hoher Blutdruck waren in diesen Schichten aufgrund veränderter, durch Wohlstand begünstigter Konsum- und Transportgewohnheiten (vor allem Automobilbesitz) häufiger anzutreffen als in den sozial benachteiligten Schichten. In diesem Zusammenhang wurde es üblich, die Herz-Kreislauf-Erkrankungen, und insbesondere ihre wichtigste Erscheinungsform, die koronaren Herzkrankheiten (KHK), als ‚Managerkrankheiten‘ zu kennzeichnen, da sie bei Männern in führenden beruflichen Positionen häufiger als bei Inhabern statusniedriger Berufe auftraten. Hierfür wurde in erster Linie ein in diesen Kreisen häufig zu beobachtendes riskantes Verhaltensmuster aus beruflicher Dauerbelastung, fehlender Entspannung, ungesunder Ernährung und häufigem Zigarettenkonsum verantwortlich gemacht (MARMOT et al. 1978).

Umfangreiche epidemiologische Studien in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg zeigten eindrucksvoll, dass jede einzelne der genannten, den Lebensstil wohlhabender Bevölkerungsgruppen bestimmenden Verhaltensweisen die statistische Wahrscheinlichkeit einer KHK erhöhte, und dass die Kombination mehrerer solcher ungesunder Verhaltensweisen ihr Risiko exponentiell ansteigen ließ (KANNEL et al. 1984). Es dauerte jedoch nicht lange, bis weitere epidemiologische Untersuchungen in den USA und in Großbritannien in den 1960er und 1970er Jahren zu dem Ergebnis gelangten, dass diese Krankheitsform sich zunehmend in den niedrigeren sozialen Schichten ausbreitete und bald diejenige der höheren sozialen Schichten übertraf. Besonders auffällig an diesem Wandel war die sozial abgestufte Verteilung der Erkrankungsrisiken: Während die Bevölkerungsgruppe mit dem ge-

ringsten Einkommen, dem niedrigsten Bildungsgrad oder der rangniedrigsten beruflichen Position (d. h. den drei zentralen Indikatoren sozialer Schichtzugehörigkeit) das höchste KHK-Risiko aufwies, lag die in der sozialen Schichtungsstruktur nächst höher gelegene Gruppe auf dem zweiten Platz, die sodann folgende Gruppe auf dem dritten Platz und so fort. Es ergab sich somit das typische Verteilungsmuster eines sozialen Gradienten: Je höher eine Person auf der sozialen Stufenleiter stand, desto niedriger war ihr Erkrankungs- und vorzeitiges Sterberisiko. Was zunächst für die KHK offenbar wurde, zeigte sich bald auch für andere weit verbreitete chronische Krankheiten und somit auch für die soziale Verteilung der Mortalität insgesamt (MARMOT et al. 1978, VAN ROSSUM et al. 2000).

Exemplarisch wurde dieses bis heute typische Verteilungsmuster in der klassischen Whitehall-Studie bei britischen Regierungsbeamten nachgewiesen. Dabei wurde die über einen 25-jährigen Beobachtungszeitraum erfasste Mortalität in einzelnen Altersgruppen nach der Höhe der beruflichen Stellung analysiert. Die in Abbildung 1 dargestellten Ergebnisse zeigen das relative Sterberisiko jeder Berufsgruppe, bezogen auf die gesamte Mortalität. In der Gruppe der 40–64-Jährigen waren bei den ranghöchsten Beamten nur etwa halb so viele Männer gestorben wie im Durchschnitt, und auch die Beamten der zweithöchsten Rangstufe hatten eine etwas niedrigere Sterblichkeit. Dagegen war sie bei einfachen Beamten deutlich erhöht. Bei den Un- und Angelernten (Dienstboten, Pförtnern) ergab sich sogar eine mehr als doppelt so hohe Frühsterblichkeit wie im Durchschnitt, und im Vergleich zur Spitzengruppe ein etwa vierfach erhöhtes Risiko. Obwohl dieser soziale Gradient sich im höheren Lebensalter abschwächte, blieb er bis in die höchste Altersgruppe weiterhin bestehen (MARMOT 2004). Drei Tatsachen sind hierbei bedeutsam: *Erstens* zeigte sich dieses Verteilungsmuster, wie bereits erwähnt, nicht nur bei der Gesamtmortalität, sondern ebenso deutlich bei der KHK-Mortalität (und weiteren, auf chronisch-degenerative Erkrankungen zurückzuführenden Todesursachen). *Zweitens* blieb der soziale Gradient der KHK-Mortalität auch nach statistischer Kontrolle des Einflusses wichtiger biomedizinischer und verhaltensbedingter Risikofaktoren bestehen, wenn auch in abgeschwächter Form (siehe unten). *Drittens* schließlich ist das hier exemplarisch dargestellte soziale Verteilungsmuster in den vergangenen drei Jahrzehnten in vielen Industrieländern nachgewiesen worden, so auch in Deutschland (MACKENBACH et al. 1997, PETER et al. 2007).

Neueste Evidenz hierzu bringt die EPIC-Studie, bei der die kumulative 9-Jahres-Mortalität einer mehr als 370 000 40–65-jährige Männer und Frauen umfassenden Kohorte aus 9 europäischen Ländern nach Alter, Geschlecht und Bildungsgrad (als verfügbares Maß sozialer Schichtzugehörigkeit) analysiert wurde (GALLO et al. 2012). Ein ausgeprägter sozialer Gradient konnte nicht nur für die Gesamtsterblichkeit, sondern auch für die Koronarsterblichkeit, für bestimmte Krebserkrankungen sowie für Unfälle und Verletzungen festgestellt werden. Rein rechnerisch könnten 29% der kardiovaskulären Todesfälle bei Männern und 34% bei Frauen vermieden werden, wenn alle Studienteilnehmer das Risikoprofil der Gruppe aufwiesen, welche einen Schulabschluss besaßen, der höher als Grund- und Hauptschule lag.

Aus dieser Evidenz epidemiologischer Studien lässt sich folgern, dass sich das Verteilungsmuster der Zivilisationskrankheiten mit der Ausbreitung des skizzierten, zunächst auf begüterte soziale Schichten begrenzten gesundheitsschädigenden Lebensstils auf weite Bevölkerungskreise systematisch verändert hat. Tatsächlich ging die Ausprägung eines inversen sozialen Gradienten von Morbidität und Mortalität mit der Verlagerung gesundheitsschädigender Verhaltensweisen von sozial besser gestellten zu schlechter gestellten

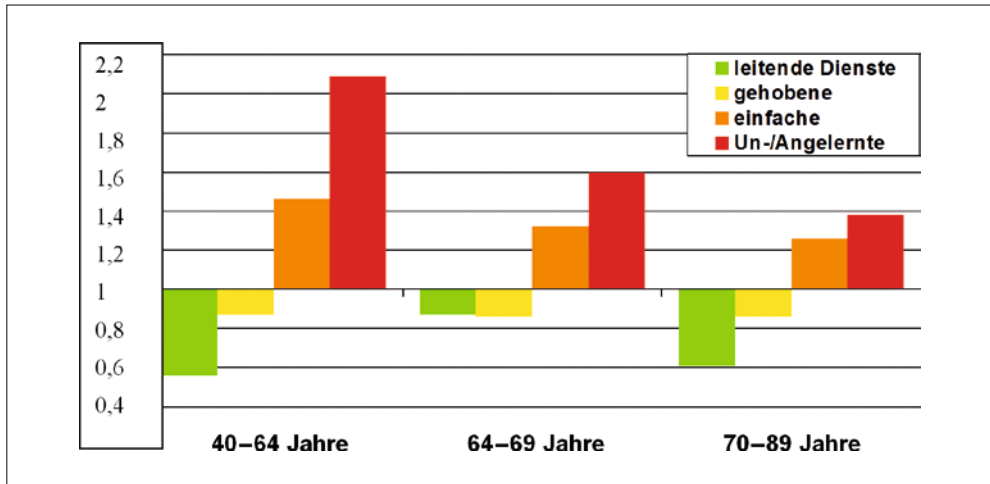


Abb. 1 Mortalitätsrate (*rate ratio*; 25 Jahre) nach Höhe der beruflichen Stellung in 3 Altersgruppen (Whitehall-Studie England; N = 18 000 Beamte). Quelle: MARMOT 2004, S. 39.

Bevölkerungsgruppen einher, so dass nunmehr ein großer Teil der Varianz sozial ungleicher Krankheitslast durch das höhere Vorkommen eines gesundheitsschädigenden Lebensstils in den niedrigeren sozialen Schichten aufgeklärt werden konnte (STRINGHINI et al. 2011). Während offenbar bildungs- und einkommensstarke Bevölkerungsschichten die gesundheitsschädigenden Lebensweisen zugunsten einer gesünderen Lebensführung sukzessive abzubauen vermochten, gelang dies in den weniger privilegierten Schichten in nur begrenztem Umfang. Hier verfestigten sich, wie neuere Untersuchungen belegten, sozialstrukturelle Benachteiligungen und Zwänge ungesunder Lebensführung vielmehr nicht nur innerhalb einer Generation, sondern sie wurden auch von den Eltern auf deren Kinder übertragen und damit sozial ‚vererbt‘ (LYNCH et al. 1997, KUH und BEN-SHLOMO 2004).

Allerdings lässt sich der soziale Gradient chronischer Krankheiten nicht allein auf den skizzierten gesundheitsschädigenden Lebensstil und dessen sozialstrukturelle Determinanten zurückführen. Bahnbrechende Studien der vergangenen zwei Jahrzehnte wiesen weitere schichtspezifische Einflussfaktoren nach. Sie sollen nachfolgend – in unterschiedlicher Ausführlichkeit – dargestellt werden, bevor abschließend nach den gesundheitspolitischen Folgerungen aus vorliegenden Erkenntnissen gefragt wird. Zuvor sei jedoch darauf hingewiesen, dass einer besonders naheliegenden Einflussgröße auf den sozialen Gradienten von Morbidität und Mortalität, den unterschiedlichen Zugangschancen und der unterschiedlichen Qualität medizinischer Versorgung einzelner Bevölkerungsschichten, keine wesentliche Erklärungskraft zukommt, zumindest nicht in den in europäischen Ländern durchgeführten Studien. Statistische Analysen zeigten, dass dieser Faktor lediglich etwa 10 bis 15% der sozialen Varianz der Morbidität aufzuklären vermag (SIEGRIST und MARMOT 2008). Indirekt wird dieses Ergebnis durch die Beobachtung gestützt, dass die Ausprägung des sozialen Gradienten weitgehend unabhängig vom Ausmaß nationaler Unterschiede im medizinischen Versorgungssystem erfolgt und dass sie selbst in denjenigen Ländern weiter vergrößert wird, die sich durch ein besonders gut ausgebautes System medizinischer Versorgung und sozialer Sicherung auszeichnen (MACKENBACH 2012).

3. Belastungen und Ressourcen in Kindheit und Jugend

Zwei Erklärungsansätze stehen heute in der internationalen Forschung im Zentrum. Der erste bezieht sich auf die frühen Phasen des Lebenslaufs und orientiert sich an den Belastungen und Ressourcen, die während der Schwangerschaft, der Kindheit und der Adoleszenz eine sozial differenzielle spätere Krankheitslast bahnen. Im zweiten Ansatz geht es um sozialstrukturell ungleich verteilte Gesundheitschancen in zentralen Bereichen des Erwachsenenlebens. Hierbei steht die Erwerbsarbeit im Vordergrund.

Durch die in Skandinavien, Großbritannien und Nordamerika durchgeführten Geburtskohortenstudien ist eine neue, für die Prävention bedeutsame Perspektive sichtbar geworden, die Lebenslaufperspektive. „Sie untersucht, wie soziale und biologische Faktoren, die in verschiedenen Phasen des Lebens und über Generationen hinweg wirksam sind, zur gesundheitlichen Ungleichheit im Erwachsenenalter beitragen. Sie stellt insbesondere die Frage, wie viel der gesundheitlichen Ungleichheit im Erwachsenenalter auf sozial differenzielle Expositionen im frühkindlichen Alter zurückzuführen ist.“¹ Wiederum spielten die Herz-Kreislauf-Erkrankungen, und speziell die KHK, eine Vorreiterrolle bei dieser neueren Forschungsrichtung. Es konnte nämlich gezeigt werden, dass verzögertes Wachstum *in utero* und postnatal, ebenso wie damit einhergehendes niedriges Geburtsgewicht, das Koronarrisiko im Erwachsenenalter deutlich erhöhte und dass diese Bedingungen bei Schwangeren bzw. Eltern aus niedrigen sozialen Schichten wesentlich häufiger vorlagen als bei sozial besser Gestellten (DAVEY SMITH und LYNCH 2004). Ungesundes Ernährungsverhalten, Suchtmittelkonsum und psychosoziale Stressbelastung während der Schwangerschaft und in den ersten vulnerablen Monaten postnatal wurden als wesentliche schichtspezifische Einflussfaktoren identifiziert. So waren beispielsweise in der 1958er Geburtskohortenstudie in Großbritannien die Kinder, deren Eltern un- und angelernte Arbeiter waren, im Mutterleib häufiger den direkten Wirkungen mütterlichen Rauchens ausgesetzt als Kinder aus höheren Sozialschichten (47% zu 30%) (POWER und KUH 2008). Schichtspezifische frühkindliche Risiken erhöhter Krankheitslast im Erwachsenenalter sind ebenso für Stoffwechselkrankheiten sowie für obstruktive Lungenerkrankungen nachgewiesen worden. Dabei spielen neben den erwähnten Faktoren eine früh erfolgte Exposition gegenüber Umwelttoxinen sowie eine hohe materielle und psychosoziale Stressbelastung der Eltern eine wichtige Rolle. Unterstrichen wird dieses Erkenntnis durch die Beobachtung, dass das relative Risiko eines späteren koronaren Ereignisses bei Personen um bis zu 80% erhöht war, deren Eltern zum Zeitpunkt ihrer Geburt in sozial prekären Verhältnissen gelebt hatten (POWER und KUH 2008).

Es erweist sich allerdings als schwierig, diese Form sozialer ‚Vererbung‘ eingeschränkter Gesundheitschancen am Lebensbeginn von den späteren Einflüssen durch Erziehung und Sozialisation, durch *Peer-group*-Kontakte sowie durch milieuspezifische Normen und Lebensformen abzugrenzen. Daher setzt sich in der Forschung immer deutlicher ein Kumulationsmodell gesundheitlicher Ungleichheit durch, welches postuliert, dass eine in früher Kindheit erworbene Vulnerabilität durch nachfolgende ungünstige Entwicklungschancen, mangelnde Ressourcen und soziale Aufstiegsbarrieren verstärkt wird. Entscheidendes Gewicht erhält dabei ein in der Adoleszenz und im frühen Erwachsenenalter erworbener gesundheitsschädigender Lebensstil. Mit dem Begriff ‚Lebensstil‘ wird die Verknüp-

1 POWER und KUH 2008, S. 46.

fung sozial ungleicher Lebenslagen (z. B. gemessen am Haushaltseinkommen) mit spezifischen Mustern der Lebensführung (z. B. ausgeprägter Genussmittelkonsum, mangelnde körperliche Aktivität, fehlende Zukunftsorientierung) gekennzeichnet. Sozialepidemiologische Studien haben die schichtspezifische Verteilung eines gesundheitsschädigenden Lebensstils nachgewiesen, der zu wesentlichen Teilen in der Adoleszenz ausgeprägt wird. Ein Beispiel hierfür gibt Abbildung 2. Hierbei wurden neuere Befragungsergebnisse bei zwei Altersgruppen in Deutschland nach sozialer Schichtzugehörigkeit ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die riskante Kombination von Rauchen, Übergewicht und Bewegungsarmut im jungen Erwachsenenalter bei Mitgliedern der niedrigsten Schicht dreimal so häufig vorkommt wie bei Mitgliedern der höchsten von fünf sozialen Schichten. Der entsprechende soziale Gradient zeigt sich sodann ebenso im mittleren Erwachsenenalter (HELMERT und SCHORB 2009).

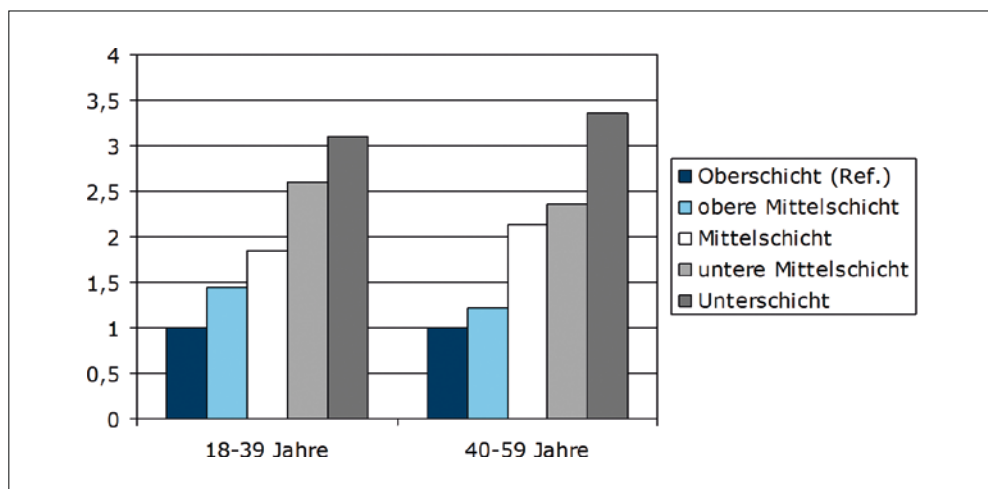


Abb. 2 Sozialer Gradient gesundheitsriskanter Verhaltensweisen. Odds-Ratios von Rauchen plus Übergewicht plus Bewegungsarmut nach Schichtzugehörigkeit in zwei Altersgruppen. Deutschland 2001–2005; Bertelsmann-Gesundheitsmonitor. Eigene Darstellung nach HELMERT und SCHORB 2009, S. 145.

Hier wiederum erweist sich die Notwendigkeit einer vertiefenden Analyse. Gesundheitsschädigende Verhaltensweisen in der Adoleszenz verfestigen sich nämlich vorwiegend bei Jugendlichen, die aufgrund eines prekären und spannungsreichen sozialen Milieus sowie aufgrund ungünstiger sozialer Vergleichsprozesse Krisen ihres Selbstkonzepts und Selbstwertgefühls erleben. Hierbei erfüllen gesundheitsschädigende Verhaltensweisen, insbesondere Alkohol- und Zigarettenkonsum, die latente Funktion einer Kompensation negativer Stimmungen und Erfahrungen, mithin der Stützung eines krisenanfälligen Selbstwertgefühls (SIEGRIST 2005).

Aus dieser Einsicht ergeben sich konkrete Folgerungen für die Gestaltung von Präventionsprogrammen im Vorschul- und Schulalter. Sie zielen auf eine Verringerung des sozialen Gradienten durch soziales Kompetenztraining und eine Stärkung gesundheitsfördernder Ressourcen ab, einschließlich einer günstigen Beeinflussung der sozialen Kontexte, in denen gesundheitsrelevantes Verhalten praktiziert wird (siehe unten). Fehlen solche die

psychosozialen Ressourcen Heranwachsender stärkenden Maßnahmen und Erfahrungen, dann verschärft sich die soziale Benachteiligung der Gesundheit im Erwachsenenalter, einem Lebensabschnitt, der durch neue Gefährdungen, aber auch durch neue Entwicklungschancen gekennzeichnet ist.

4. Erwerbsleben und Gesundheit

Die Chancen einer gesundheitsförderlichen Lebensgestaltung im Erwachsenenalter sind in jeder Gesellschaft ungleich verteilt. Dies gilt für zentrale Bereiche wie Einkommen, Wohnqualität, familiäre Situation, soziale Integration und kulturelle Teilhabe. In modernen Leistungsgesellschaften wird der soziale Status Erwachsener weitgehend von den Sozialisationsbedingungen während der Kindheit, insbesondere den in Schule und Ausbildung erworbenen Qualifikationen und von den Opportunitäten des Arbeitsmarktes bestimmt. Bildung, Beschäftigung bzw. Höhe der beruflichen Stellung sowie Einkommen bilden eine ‚meritokratische Triade‘, welche die vertikale Differenzierung, die soziale Schichtungsstruktur einer Gesellschaft wesentlich bestimmt. Dabei kommt dem Statusmerkmal ‚Bildung‘ eine herausragende Rolle zu, zum einen, weil Bildung die wichtigste ‚Mobilitätsschleuse‘ für den späteren Statuserwerb darstellt, zum andern, weil sie Basisqualifikationen der Lebensführung (einschließlich des oben genannten gesundheitsrelevanten Lebensstils), der beruflichen Leistungsfähigkeit und der soziokulturellen Teilhabe vermittelt. Die Befähigung zu Erwerbsarbeit und zu damit verbundener autonomer, individueller Lebensgestaltung im Erwachsenenalter ist ein wesentliches Ziel gesellschaftlicher Sozialisationsprozesse. Am Erwerbsleben kontinuierlich teilzunehmen, ist von zentraler Bedeutung für das Wohlbefinden und die Gesundheit der Beschäftigten. Diese Bedeutung ergibt sich zunächst daraus, dass der Beruf für die meisten Menschen noch immer die einzige, zumindest die wichtigste Quelle eines regelmäßigen Erwerbseinkommens darstellt. Der Beruf sichert ferner den sozialen Status einer Person und bestärkt sie in ihrer sozialen Identität. Nirgends werden vermutlich so intensive Erfahrungen von Erfolg, allerdings auch von Misserfolg (siehe unten), gemacht wie im Berufsleben. Der Beruf stellt wiederkehrende Anforderungen an das Leistungsvermögen der Arbeitenden, er eröffnet vielen Menschen neue Lernchancen und stimulierende Erfahrungen, die sich positiv auf die Gesundheit auswirken können. Wie tief reichend diese Erfahrungen sind, lässt sich indirekt an den negativen gesundheitlichen Folgen bei Menschen erkennen, die ihren Arbeitsplatz verloren haben und dadurch in eine längerfristige Arbeitslosigkeit abgeglitten sind. Erhöhte Risiken von Suchtmittelkonsum, psychischen Störungen, Suizidhandlungen und kardiovaskulärer Mortalität sind als Folge von Langzeitarbeitslosigkeit nachgewiesen worden (GALLO et al. 2004).

Jedoch kann auch eine längerfristige Exposition gegenüber gesundheitsgefährdenden Bedingungen am Arbeitsplatz die Morbiditäts- und Mortalitätsrisiken der arbeitenden Bevölkerung erhöhen und damit die skizzierten positiven Wirkungen beruflicher Tätigkeit schmälern. Trotz beeindruckender Fortschritte arbeitsmedizinischer Prävention und umfassender gesetzlicher Regelungen stellt die der Erwerbsarbeit zuzurechnende Krankheitslast nach wie vor eine bedeutsame gesundheitspolitische Herausforderung dar. Allerdings stehen hierbei nicht allein die Berufskrankheiten und die arbeitsbedingten Unfälle im Vordergrund, sondern ebenso ausgeprägte psychische Belastungen und Beanspruchungen mo-

derner Erwerbsarbeit, die zu erhöhter Arbeitsunfähigkeit und krankheitsbedingter Frühberentung beitragen. Diese Belastungen und Beanspruchungen lassen sich auf eine spürbare Zunahme des Leistungs- und Wettbewerbsdrucks, insbesondere als Folge der ökonomischen Globalisierung, zurückführen. Hinzu kommen gesteigerte Anforderungen an Flexibilität, Mobilität und Anpassungsfähigkeit der Erwerbstätigen, die sich in einem Kontext zunehmender ‚Fragmentierung‘ der Erwerbsbiographie durch Berufswechsel, Umschulung, Zeitverträge, Perioden der Arbeitslosigkeit und generell gesteigerter Arbeitsplatzunsicherheit ereignen. Wenn auch mit der Ausbreitung von Automation und der Verlagerung des Erwerbssektors von der industriellen Produktion zu Dienstleistungen die schwere körperliche Arbeit in den Hintergrund getreten ist, so tragen die erwähnten psychomentalen Belastungen in zunehmendem Maße zu den heute vorherrschenden arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren bei.

Wie ist es nun möglich, angesichts der Vielfalt und Heterogenität der skizzierten Belastungen moderner Arbeitswelt diejenigen Aspekte herauszufiltern, welche die Gesundheit von Beschäftigten nachweislich gefährden? An dieser Stelle hat es sich als fruchtbar erwiesen, Erkenntnisse der verhaltens- und sozialwissenschaftlichen Stressforschung in die Analyse einzubeziehen. Bestimmte objektive Arbeitsbedingungen wirken dabei als chronische soziale Stressoren. Soziale Stressoren konfrontieren die ihnen ausgesetzten Personen mit bedrohlichen Herausforderungen, d. h. Herausforderungen, welche eine erfolgreiche Bewältigung erfordern, obwohl diese – beispielsweise aufgrund besonderer Schwierigkeit oder fehlender Zeit – keineswegs sichergestellt ist. Vielmehr lösen Befürchtungen und Erfahrungen von Misserfolg, Kontrollverlust und Bestrafung intensive negative Emotionen und psychobiologische Stressreaktionen im Organismus der betroffenen Person aus. Erfolgen solche Befürchtungen und Erfahrungen wiederkehrend über einen längeren Zeitraum, dann erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Entwicklung einer stressassoziierten psychischen oder körperlichen Krankheit (RENSING et al. 2006).

Als chronische soziale Stressoren moderner Erwerbsarbeit wirken vorwiegend diejenigen Arbeitsbedingungen, die zentrale psychische Bedürfnisse oder Motivationen der Beschäftigten bedrohen. Hierzu zählen das Bedürfnis nach Sicherheit und sozialer Zugehörigkeit, das Streben nach erfolgreichem, selbständigem Handeln, der Wunsch nach angemessener Anerkennung für die geleistete Arbeit und die Erwartung, von anderen fair behandelt zu werden. Anhand eines theoretischen Modells kann das Zusammenspiel der diese Bedürfnisse bedrohenden Arbeitsbedingungen mit den Handlungen, Motivationen und Erfahrungen arbeitender Personen spezifiziert, d. h. aus dem komplexen Beziehungsgeflecht der vielfältigen Arbeitswelt herausgefiltert und auf einer abstrakten, verallgemeinerbaren Ebene definiert werden. Ein solches theoretisches Modell benennt somit diejenigen Bedingungen, die für das Zustandekommen arbeitsbedingter Gesundheitsstörungen ausschlaggebend sind.

In der auf das Erwerbsleben bezogenen psychosozialen Stressforschung gibt es zwar eine ganze Reihe solcher theoretischer Modelle (als Übersicht z. B. CARTWRIGHT und COOPER 2009), aber nur wenige sind nach den hohen, international etablierten Qualitätskriterien der Forschung bezüglich ihrer Eignung, stressassoziierte Erkrankungsrisiken vorherzusagen bzw. zu erklären, wiederholt und unabhängig getestet worden. Am ehesten trifft dies für die nachfolgend erläuterten beiden Konzepte, das Anforderungs-Kontroll-Modell und das Modell beruflicher Gratifikationskrisen, zu. Ein drittes Konzept, das Modell der Organisationsgerechtigkeit, ist an dieser Stelle zu erwähnen (GREENBERG 2010).

Es erfasst gesundheitliche Auswirkungen mangelnder Fairness bei organisations- bzw. betriebsinternen Verfahrensweisen, Verteilungsmustern und zwischenmenschlichen Beziehungen, ist jedoch im Vergleich zu den beiden anderen Modellen bisher weniger umfangreich empirisch getestet worden.²

Das Anforderungs-Kontroll-Modell (KARASEK und THEORELL 1990) konzentriert sich auf bestimmte Aspekte des Tätigkeitsprofils, welches den Beschäftigten die Erfahrung von Autonomie und Selbstwirksamkeit ermöglicht oder verwehrt (vgl. Abb. 3). Danach sind diejenigen Personen durch Arbeitstress gesundheitlich besonders gefährdet, die hohen quantitativen Anforderungen ausgesetzt sind (z. B. permanenter Zeitdruck), ohne dass sie ausreichende Kontrolle und Entscheidungsmacht über die Ausführung ihrer Tätigkeit besitzen. Demnach gefährdet nicht die Leistungsmenge an sich die Gesundheit, sondern die Leistung unter Bedingungen niedriger Kontrollierbarkeit von Arbeitsablauf und Arbeitsinhalt. Klassisches Beispiel dieser Konstellation ist die Fließbandarbeit der industriellen Massenfertigung. Jedoch findet sie sich heute auch gehäuft bei statusniedrigen Dienstleistungsberufen. Fehlende Autonomie und Selbstwirksamkeit sowie ein Mangel an stimulierenden Erfahrungen und Lernchancen verschärfen das Belastungserleben besonders dann, wenn eine zusätzliche, in der Abbildung nicht dargestellte Bedingung gegeben ist, fehlender sozialer Rückhalt durch Kollegen und Vorgesetzte am Arbeitsplatz. Durch die Herausstellung der gesundheitswirksamen Bedeutung von fehlender Kontrolle am Arbeitsplatz nimmt dieses inzwischen weltweit untersuchte Modell eine wichtige Stellung in der arbeitsmedizinischen Forschung ein (siehe unten).

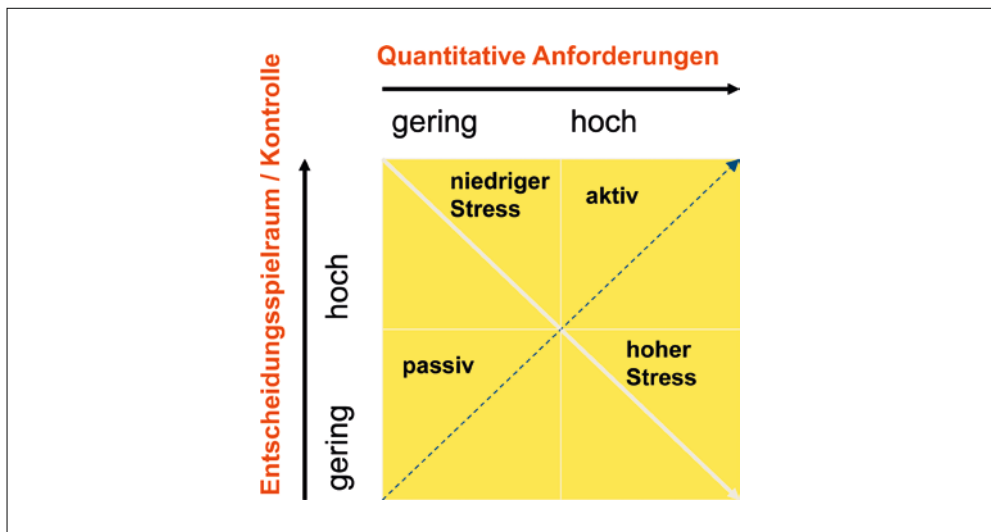


Abb. 3 Das Anforderungs-Kontroll-Modell psychosozialer Arbeitsbelastungen. Quelle nach KARASEK und THEORELL 1990

2 Vgl. allerdings NDJABOUE et al. 2012.

Das in unserer Arbeitsgruppe entwickelte Modell beruflicher Gratifikationskrisen (SIEGRIST 1996) befasst sich mit den vertraglichen Bedingungen der Arbeit, d. h. dem Tauschprozess von Leistung und Gegenleistung. Wird der Grundsatz der Tauschgerechtigkeit bei der Arbeit in der Form verletzt, dass einer hohen Verausgabung keine angemessene Belohnung gegenübersteht, dann werden „gratifikationskritische“ Stressreaktionen ausgelöst (vgl. Abb. 4). Belohnungen umfassen nicht allein Lohn oder Gehalt, sondern ebenso Aufstiegschancen, Arbeitsplatzsicherheit sowie nicht-materielle Anerkennung und Wertschätzung des Geleisteten. Das im Modell definierte Ungleichgewicht zwischen erbrachter Leistung und erzieltm oder erwartbarem Gewinn wird als wiederkehrender Stressor besonders häufig bei Beschäftigten erfahren, die keine Arbeitsplatzalternative finden (z. B. aufgrund niedriger Qualifikation) oder die in einem sehr kompetitiven Berufssektor beschäftigt sind. Dieses Ungleichgewicht kann aber auch zusätzlich durch intrinsische, in der arbeitenden Person liegende Faktoren verstärkt und aufrechterhalten werden. Im Modell wird diesbezüglich das Vorliegen einer spezifischen Arbeitsmotivation identifiziert, welche als übersteigerte Verausgabungsneigung charakterisiert werden kann. Stresstheoretisch sind die im Modell herausgestellten enttäuschten Belohnungserwartungen und -erfahrungen deshalb so gravierend, weil sie als Bruch eines grundlegenden, in der Evolution menschlicher Vergesellschaftung tragenden Prinzips, der Norm sozialer Reziprozität, erlebt werden.

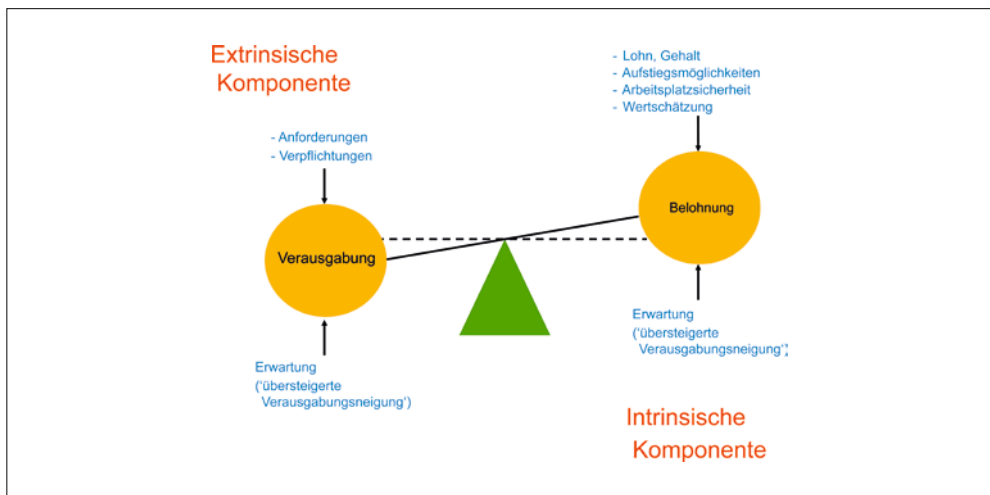


Abb. 4 Das Modell beruflicher Gratifikationskrisen. Quelle nach SIEGRIST 1996

Beide Arbeitsstressmodelle sind in umfangreichen epidemiologischen Längsschnittstudien bei erwerbstätigen Bevölkerungsgruppen getestet worden. Heute liegt eine umfangreiche empirische Evidenz zu Auswirkungen entsprechender psychosozialer Belastungen auf erhöhte stressassoziierte Erkrankungsrisiken vor (SCHNALL et al. 2009). Besonders robust ist sie bezüglich der auch gesundheitspolitisch hoch bedeutsamen Herz-Kreislauf-Krankheiten (STEPTOE und KIVIMÄKI 2012) und depressiven Störungen (STANSFELD und CANDY 2006). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das relative Risiko einer KHK bei beruflich stark belasteten Beschäftigten um durchschnittlich etwa 40% höher ist als bei nicht oder gering-

fällig belasteten, und zwar nach statistischer Kontrolle des Einflusses wichtiger kardiovaskulärer Risikofaktoren (BACKÉ et al. 2012). Noch stärker ausgeprägt sind entsprechende Zusammenhänge mit depressiven Störungen. Hier zeigen die Befunde eine knappe Risikoverdoppelung bei von Arbeitsstress Betroffenen (NIEUWENHUIJSEN et al. 2010).

Interessanterweise sind die erwähnten, anhand prospektiver Studien ermittelten statistischen Zusammenhänge nicht auf Beschäftigte in modernen westlichen Industrieländern beschränkt, sondern zeigen sich auch in andern Kontinenten, insbesondere in asiatischen Ländern. Ein Beispiel hierfür gibt Abbildung 5. Die Ergebnisse entstammen einer vergleichenden Analyse psychosozialer Arbeitsbelastungen (hohe Verausgabung in Kombination mit niedriger Belohnung; niedrige Kontrolle) bei beschäftigten 50–64-jährigen Männern und Frauen aus 14 europäischen Ländern, den USA und Japan (N = 14 236) und ihres Zusammenhangs mit ausgeprägten depressiven Störungen. In allen drei Kontinenten zeigt sich eine signifikant erhöhte Wahrscheinlichkeit, von depressiven Symptomen betroffen zu sein, wenn berufliche Gratifikationskrisen gemessen wurden, und in zwei Kontinenten werden analoge signifikante Effekte bei Vorliegen niedriger Kontrolle am Arbeitsplatz beobachtet. Während die in der Abbildung dargestellten Beziehungen auf einer Analyse von Querschnittsdaten beruhen, konnten sie zwischenzeitlich für die Mehrzahl der untersuchten Länder auch im Längsschnitt nachgewiesen werden (SIEGRIST et al. 2012). Erhöhte KHK-Risiken infolge psychosozialer Arbeitsbelastungen sind ebenfalls in einigen Schwellenländern ermittelt worden, so insbesondere in China (XU et al. 2009). Angesichts einer zunehmend globalisierten Wirtschaft zeigt sich die sozial- und gesundheitspolitische Relevanz solcher epidemiologischer Befunde.

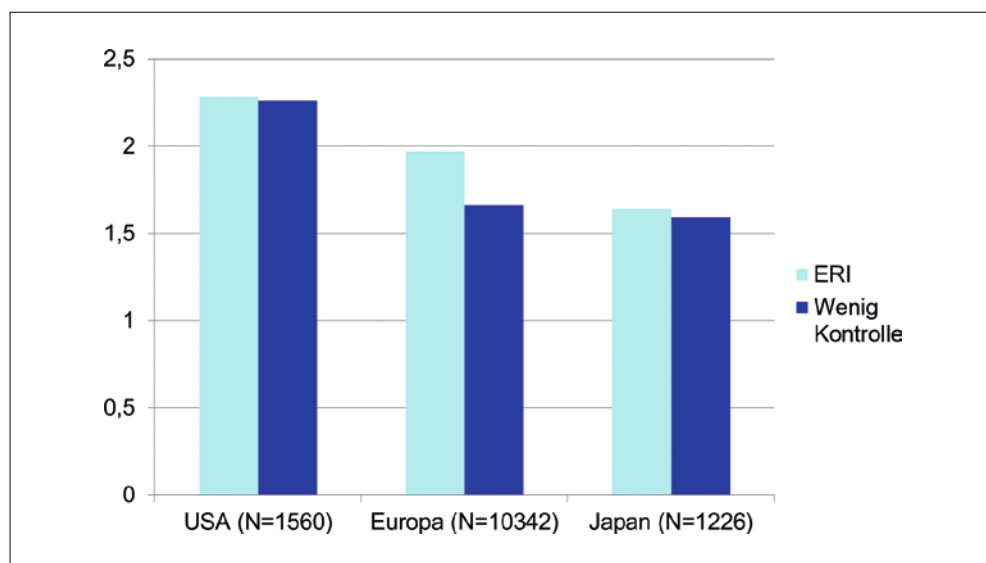


Abb. 5 Arbeitsstress und depressive Symptome bei 13 128 Beschäftigten* (50–64 Jahre) aus 17 Ländern in drei Kontinenten (SHARE, ELSA, HRS, JSTAR). Alle *Odds-Ratios* sind signifikant erhöht mit Ausnahme „Wenig Kontrolle“ in Japan. ERI = Effort-reward imbalance (Gratifikationskrise). Quelle nach SIEGRIST et al. 2012, modifiziert. *Fehlende Werte bei 1108 Personen.

Statistische Beziehungen stellen, selbst wenn sie aus prospektiven Studien abgeleitet wurden, keinen Beweis dar für das Vorliegen eines kausalen Zusammenhangs. Jedoch unterstützen ergänzende experimentelle Untersuchungen zu wichtigen Bindegliedern zwischen sozialen Stressoren im Erwerbsleben und den beiden bedeutsamen Krankheitsbildern eine entsprechende Annahme. Im Fall der KHK zeigen experimentelle Studien beispielsweise erhöhte Blutdruckwerte, geringere Herzfrequenzvariabilität, eine erhöhte Blutgerinnungsneigung und höhere körpereigene Entzündungswerte bei Vorliegen beruflicher Belastungen nach den zitierten Modellen (STEPTOE und KIVIMÄKI 2012). Mit Bezug auf psychische Störungen wurden analoge Zusammenhänge mit veränderten Mustern der Stresshormonausscheidung (vor allem Cortisol; CHANDOLA et al. 2010) und einer verminderten Immunkompetenz (NAKATA 2012) nachgewiesen.

Zusammenfassend können wir festhalten, dass die Krankheitslast der erwerbsaktiven Bevölkerung in modernen Industrieländern – und zunehmend in Schwellenländern – trotz beeindruckender technischer Fortschritte und signifikanter Verbesserungen von Arbeitsschutz und arbeitsmedizinischer Betreuung weiterhin eine große gesundheitspolitische Herausforderung darstellt. Zwar hat eine deutliche Verlagerung pathogener Bedingungen von den körperlichen hin zu den psychomentalen und emotionalen Belastungen stattgefunden, jedoch erhöhen letztere unter den oben genannten Bedingungen stressassoziierte Erkrankungsrisiken. Am überzeugendsten ist dies für kardiovaskuläre Erkrankungen und für depressive Störungen nachgewiesen worden. Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass Herz-Kreislauf-Krankheiten und Depressionen in globaler Perspektive nach einer ernstzunehmenden Prognose demnächst an vorderster Stelle aller Ursachen für vorzeitigen Tod und für eine durch Behinderung eingeschränkte Lebensqualität stehen (MURRAY und LOPEZ 1997).

5. Folgerungen für die Prävention

Welche gesundheitspolitischen Maßnahmen ergeben sich aus der skizzierten Last chronischer Krankheiten? Nach dem Gesagten erscheint es zwingend, ihre vorrangigen Einflussfaktoren zu verringern, d. h. durch Aktivitäten der primären Prävention der weiteren Ausbreitung von Zivilisationskrankheiten entgegenzuwirken. Orientiert man sich an den 10 führenden Todesursachen westlicher Industrieländer, so könnte rein rechnerisch etwa die Hälfte der durch diese Krankheiten verursachten Sterblichkeit auf die oben erwähnten Faktoren eines gesundheitsschädigenden Lebensstils zurückgeführt werden. Daher sind umfangreiche bevölkerungsmedizinische Präventionsprogramme entwickelt worden, um diesen Lebensstil durch gesundheitsfördernde Maßnahmen zu bekämpfen. Hierbei wird die Verhaltensprävention von der Verhältnisprävention unterschieden. Während erstere die Einstellungen, Motivationen und Handlungskompetenzen von Individuen und Gruppen durch Gesundheitserziehung und Verhaltensmodifikation günstig zu beeinflussen versucht, zielt letztere auf die Schaffung gesundheitsfördernder Bedingungen der Lebenswelt, beispielsweise durch den Erlass von Verordnungen und Verboten (Rauchverbot, Anschnallpflicht beim Autofahren), durch Preispolitik (hohe Besteuerung von Alkohol und Zigaretten), durch Beeinflussung des Lebensmittelmarkts (höheres Angebot von Obst und Gemüse) oder durch Maßnahmen des Umweltschutzes (Lärmschutz, Gebäudesanierung).

In der Praxis hat sich gezeigt, dass dauerhafte Wirkungen präventiver Aktivitäten ein Zusammenwirken von Verhaltens- und Verhältnisprävention erfordern. Besonders eindrucksvoll wurde dies in einer der erfolgreichsten kommunalen Präventionsstudien, dem „Nordkarelien-Projekt“ in Finnland, nachgewiesen (PUSKA 1996). Kommunale Prävention bedeutet, dass die Gesundheit der gesamten Bevölkerung eines Ortes oder einer Region Ziel eines Bündels koordinierter Aktivitäten ist, unabhängig von dem eigenen Gesundheitszustand, dem Alter und dem Geschlecht der Personen. Im Nordkarelien-Projekt konnte durch Mobilisierung und gezielte Förderung bereits vorhandener Ressourcen (z. B. Aktivität von Sportvereinen, Unterrichtsprogramme in Schulen, Einbeziehung von ‚Opinion leaders‘), durch Werbekampagnen in den Medien und durch Schaffung gesundheitsfördernder Kontexte (z. B. Umstellen von Kantinenessen auf fettarme Speisen) auf diese Weise eine signifikante Senkung der Sterblichkeit an KHK sowie an Lungenkrebs erzielt werden. So verringerte sich beispielsweise die altersangepasste KHK-Sterblichkeit bei den 35–64-jährigen Männern im Zeitraum von 1969 bis 1989 um 46 %, bis zum Jahr 2005 sogar um 85 % (PUSKA 2010).

Auch einzelne Programme wie beispielsweise konsequent durchgeführte körperliche Aktivität können das Sterberisiko an führenden Todesursachen verringern (LI und SIEGRIST 2012). Am bedeutendsten sind diesbezüglich Aktivitäten zur Bekämpfung des Rauchens. Neben bereits erwähnten verhältnispräventiven Anti-Raucher-Maßnahmen (z. B. Verkaufs- und Werbeverbote) erweisen sich schulische Gesundheitsprogramme, welche auch die sozialen Kompetenzen von Schülern stärken, sowie gruppendynamische Kampagnen (z. B. Wettbewerb „Be smart – don’t start“) als wirksam (SIEGRIST 2005). In globaler Perspektive zählt die Bekämpfung des Tabakkonsums zu den vordringlichsten präventiven Maßnahmen überhaupt (MATHERS und LONCAR 2006).

In Anbetracht des oben dargestellten sozialen Gradienten von Morbidität und Mortalität richten sich weitere gesundheitspolitische Maßnahmen vor allem auf eine günstige Beeinflussung besonders vulnerabler Bevölkerungsgruppen und belastungsreicher Lebensphasen. Als ein Beispiel seien hier Programme zur Verbesserung der Lage von Schwangeren und jungen Eltern aus sozial benachteiligten Schichten genannt. Ihr Ziel besteht darin, Risiken von ungeplanter Schwangerschaft und Alleinerziehung zu senken, Schwangere in ihrem Gesundheitsverhalten zu stärken und Eltern in der Frühphase der Säuglingsbetreuung in ihrem Bindungs- und Erziehungsverhalten zu schulen, oft in Kombination mit materieller Hilfe. In verschiedenen Ländern, besonders eindrucksvoll neuerdings in Großbritannien, sind diese Programme durch die Politik mit dem Ziel gefördert worden, die soziale Ungleichheit von Gesundheit und Krankheit zu verringern (MARMOT 2010).

Ein weiteres Beispiel gesundheitspolitischer Maßnahmen betrifft die auf das Erwerbsleben bezogene Gesundheitsförderung. Hauptakteure primärer und sekundärer Prävention arbeitsbedingter Gesundheitsstörungen sind zweifellos die Betriebe. Ihnen eröffnet sich ein breites Handlungsspektrum, das von der Gefährdungsbeurteilung ganzer Belegschaften über die spezielle Betreuung gesundheitlich gefährdeter sowie manifest erkrankter und wieder einzugliedernder Beschäftigter bis zur Implementierung gesundheitsfördernder Programme der Organisations- und Personalentwicklung einschließlich der Schulung von Führungsverhalten reicht. Auf allen Stufen können die hier nur ansatzweise referierten neuen Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Arbeitsbelastungen und eingeschränkter Gesundheit Berücksichtigung finden. Konkrete Interventionen beinhalten beispielsweise eine Ausweitung von Kontrollspielräumen bei der Erledigung von Arbeits-

aufgaben („job enrichment“, „job enlargement“), die Mitgestaltung von Arbeitszeiten und den Ausbau beruflicher Weiterqualifizierung (Anforderungs-Kontroll-Modell). Strukturelle Änderungen gemäß dem Modell beruflicher Gratifikationskrisen beziehen sich u. a. auf die Etablierung einer fairen Lohnpolitik, die auch kompensierende Lohndifferenziale berücksichtigt, und auf die Entwicklung einer innerbetrieblichen Anerkennungskultur, da neben dem Belohnungsmittel Geld und neben der zentralen Bedeutung des Erhalts und der Weiterentwicklung beruflicher Positionen den nicht-monetären Gratifikationen in Form von Wertschätzung geleisteter Arbeit eine wichtige Funktion zukommt. Bereits zeigen erste Ergebnisse aus Interventionsstudien, welche an den erwähnten Arbeitsstressmodellen orientiert waren, positive Auswirkungen auf die Gesundheit der Beschäftigten (BOURBONNAIS et al. 2011). Wenn es in größerem Umfang gelingt, in die Entwicklung einer gesundheitsfördernden Arbeit in Form von Aufgaben mit hoher Autonomie, guten Lern- sowie Entwicklungschancen und in Form von Erfahrungen angemessener Gratifikationen sowie fairem, gerechtem Umgang zu investieren, dann wird damit zugleich ein wesentlicher Beitrag zur Verringerung des sozialen Gradienten chronischer Erkrankungen geleistet.

Angesichts des skizzierten Problemdrucks infolge wachsender Last chronischer Krankheiten sollte letztlich eine verschiedene Politikbereiche durchdringende Gesundheitspolitik entwickelt und umgesetzt werden, zu deren wesentlichen Zielen die Verringerung vermeidbarer gesundheitlicher Ungleichheiten, die Wahrung menschlicher Würde und die Sicherung nachhaltiger Entwicklungschancen kommender Generationen gehören.

Literatur

- BACKÉ, E. M., SEIDLER, A., LATZA, U., ROSSNAGEL, K., and SCHUMANN, B.: The role of psychosocial stress at work for the development of cardiovascular disease: a systematic review. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 85, 67–79 (2012)
- BOURBONNAIS, R., BRISSON, C., and VEZINA, M.: Long-term effects of an intervention on psychosocial work factors among health care professionals in a hospital setting. *Occup. Environ. Med.* 65, 438–445 (2011)
- CARTWRIGHT, S., and COOPER, C. L. (Eds.): *The Oxford Handbook of Organizational Well-Being*. Oxford: Oxford University Press 2009
- CHANDOLA, T., HERACLIDES, A., and KUMARI, M.: Psychophysiological biomarkers of workplace stressors. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 35, 51–57 (2010)
- DAVEY SMITH, G., and LYNCH, J.: Life course approaches to socio-economic differentials in health. In: KUH, D., and BEN-SHLOMO, Y. (Eds.): *Life Course Approaches to Chronic Disease Epidemiology*; pp. 77–115. Oxford: Oxford University Press 2004
- GALLO, W., BRADLEY, E. H., FALBA, T. A., DALIN, J. A., CRAMER, L. D., BOGARDUS, S. T. JR., and KASL, S. V.: Involuntary job loss as a risk factor for subsequent myocardial infarction and stroke: Findings from the Health and Retirement Study. *Amer. J. Ind. Med.* 45, 408–416 (2004)
- GALLO, V., MACKENBACH, J. P., EZZATI, M., MENVIELLE, G., KUNST, A. M., ROHRMANN, S., KAAKS, R., TEUCHER, B., BOEING, H., BERGMANN, M. M., and VINEIS, P.: Social inequalities and mortality in Europe-Results from a large multi-national cohort. *PLoS ONE* 7/7, e39013 (2012)
- GREENBERG, J.: Organizational injustice as an occupational health risk. *The Academy of Management Annals* 4, 205–243 (2010)
- HELMERT, U., und SCHORB, F.: Die Bedeutung verhaltensbezogener Faktoren im Kontext der sozialen Ungleichheit der Gesundheit. In: RICHTER, M., und HURRELMANN, K. (Eds.): *Gesundheitliche Ungleichheit*. S. 133–148. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2009

- KANNEL, W. B., DOYLE, J. T., OSTFELD, A., JENKINS, D., KULLER, L., PODELL, R., and STAMLER, J.: Optimal resources for primary prevention of atherosclerotic diseases. *Circulation* 29, 157A–205A (1984)
- KARASEK, T., and THEORELL, T.: *Healthy Work. Stress, Productivity, and the Reconstruction of Working Life*. New York: Basic Books 1990
- KUH, D., and BEN-SHLOMO, Y. (Eds.): *A Life Course Approach to Chronic Disease Epidemiology*. Oxford: Oxford University Press 2004
- LI, J., and SIEGRIST, J.: Physical activity, aging and health. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 9, 391–407 (2012)
- LYNCH, J. W., KAPLAN, G. A., and SALONEN, J. T.: Why do poor people behave poorly? Variation in adult health behaviour and psychological characteristics by stages of the socioeconomic life course. *Soc. Sci. Med.* 44, 809–819 (1997)
- MACKENBACH, J. P.: The persistence of health inequalities in modern welfare states: the explanation of a paradox. *Soc. Sci. Med.* 75, 761–769 (2012)
- MACKENBACH, J. P., KUNST, A. E., CAVELAARS, A. D., GROENHOF, F., GEURTS, J., and *The EU Working Group on Socioeconomic Inequalities in Health*: Socioeconomic inequalities in morbidity and mortality in Western Europe. *Lancet* 349, 1655–1659 (1997)
- MARMOT, M.: *Status Syndrome*. London: Bloomsbury 2004
- MARMOT, M.: *The Marmot Review. Fair Society, Healthy Lives*. London: University College of London 2010
- MARMOT, M., ADELSTEIN, A. M., ROBINSON, N., and ROSE, G.: The changing social class distribution of heart disease. *Brit. Med. J.* 2, 1109–1112 (1978)
- MATHERS, C. D., and LONCAR, D.: Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030. *PLoS Med.* 3, e442 (2006)
- McKEOWN, T.: *Die Bedeutung der Medizin*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1982
- MURRAY, C. J. L., and LOPEZ, A. D.: Alternative projections of mortality and disability by cause 1990–2020: Global Burden of Disease Study. *Lancet* 349, 1498–1504 (1997)
- NAKATA, A.: Psychosocial job stress and immunity: A systematic review. In: YAN, Q. (Ed.): *Psychoneuroimmunology: Methods and Protocols*; pp. 39–76. New York: Springer 2012
- NDJABOÛ, R., BRISSON, C., and VÉZINA, M.: Organizational injustice and mental health: A systematic review of prospective studies. *Occup. Environ. Med.* 69, 694–700 (2012)
- NIEUWENHUIJSEN, K., BRUINVELS, P., and FRINGS-DRESEN, M.: Psychosocial work environment and stress-related disorders. A systematic review. *Occup. Med.* 60, 272–286 (2010)
- PETER, R., GÄSSLER, H., and GEYER, S.: Socioeconomic status, status inconsistency and risk of ischemic heart disease. A prospective study among members of a statutory health insurance company. *J. Epidemiol. Community Health* 61, 605–611 (2007)
- POWER, C., and KUH, D.: Die Entwicklung gesundheitlicher Ungleichheiten im Lebenslauf. In: SIEGRIST, J., and MARMOT, M. (Eds.): *Soziale Ungleichheit und Gesundheit: Erklärungsansätze und gesundheitspolitische Folgerungen*. S. 45–76. Bern: Huber 2008
- PUSKA, P.: Community intervention in cardiovascular disease prevention. In: ORTH-GOMER, K., and SCHNEIDERMAN, N. (Eds.): *Behavioural Medicine Approaches to Cardiovascular Disease Prevention*; pp. 237–267. Mahwah, NJ: Erlbaum 1996
- PUSKA, P.: *The North Karelia Project*. Helsinki: National Institute for Health and Welfare 2010
- RENSING, L., KOCH, M., RIPPE, B., and RIPPE, V.: *Mensch im Stress*. München: Elsevier 2006
- SALOMON, J. A., and MURRAY, C. J. L.: The epidemiologic transition revisited: Compositional models for causes of death by age and sex. *Popul. Dev. Rev.* 28, 205–228 (2002)
- SCHNALL, P. L., DOBSON, M., and ROSSKAM, E. (Eds.): *Unhealthy Work*. Amityville, NY: Baywood 2009
- SIEGRIST, J.: *Soziale Krisen und Gesundheit. Eine Theorie der Gesundheitsförderung am Beispiel von Herz-Kreislauf-Risiken im Erwerbsleben*. Göttingen: Hogrefe 1996
- SIEGRIST, J.: *Medizinische Soziologie*. 6. Aufl. München: Elsevier 2005
- SIEGRIST, J., LUNAU, T., WAHRENDORF, M., and DRAGANO, N.: Depressive symptoms and psychosocial stress at work among older employees in three continents. *Globalization and Health* 8, 27 (2012)
- SIEGRIST, J., and MARMOT, M. (Eds.): *Soziale Ungleichheit und Gesundheit: Erklärungsansätze und gesundheitspolitische Folgerungen*. Bern: Huber 2008
- STANSFELD, A., and CANDY, B.: Psychosocial work environment and mental health: A meta-analytic review. *Scand. J. Work Environ. Health* 32, 443–462 (2006)
- STEPTOE, A., and KIVIMÄKI, M.: Stress and cardiovascular disease. *Nature Rev. Cardiol.* 9, 360–370 (2012)

- STRINGHINI, S., DUGRAVOT, A., SHIPLEY, M., GOLDBERG, M., ZINS, M., KIVIMÄKI, M., MARMOT, M., SABIA, S., and SINGH-MANOUX, A.: Health behaviours, socioeconomic status, and mortality: Further analyses of the British Whitehall II and the French GAZEL Prospective Cohorts. *PLoS Med* 8/2, e 1000419 (2011)
- VAN ROSSUM, C. T. M., SHIPLEY, M. J., VAN DE MHEEN, H., GROBBEE, D. E., and MARMOT, M. G.: Employment grade differences in cause specific mortality: A 25-year follow-up of civil servants from the first Whitehall study. *J. Epidemiol. Community Health* 54, 178–184 (2000)
- XU, W., ZHAO, Y., and GUO, Y.: Job stress and coronary heart disease: a case-control study using a Chinese population. *J. Occup. Health* 51, 107–113 (2009)

Prof. Dr. Johannes SIEGRIST
Seniorprofessur für Psychosoziale Arbeitsbelastungsforschung
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Life Science Center
Merowingerplatz 1a
40225 Düsseldorf
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 211 3 85 42 81 11
E-Mail: johannes.siegrist@med.uni-duesseldorf.de

Instrumente zur Vermittlung von Wertewandel und Verhaltensänderungen im nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen der Erde

Renate SCHUBERT (Zürich)

Mit 3 Abbildungen und 3 Tabellen



Zusammenfassung

Ein nachhaltiger Umgang mit den Ressourcen der Erde ist dringend erforderlich, sollen heutige und künftige Generationen ihre Bedürfnisse befriedigen können. Dies wäre gefährdet, käme es zu ungebremstem globalen Klimawandel bei stark fossil basierten Energiesystemen, zur Übernutzung globaler Gemeinschaftsgüter wie Land und Meer oder zu einem nicht-nachhaltigen Abbau nicht erneuerbarer Mineralien und Erze. Aus technologischer Sicht sind bereits eine Vielzahl von Verfahren für einen global nachhaltigeren Umgang mit natürlichen Ressourcen vorhanden. Sie werden jedoch in viel zu geringem Ausmaß eingesetzt. Dies scheint nicht in erster Linie an fehlenden Werten zu liegen: Weltweit scheinen die Menschen durchaus starke Präferenzen für nachhaltiges Wirtschaften zu haben. Ökonomische und institutionelle Rahmenbedingungen sorgen jedoch dafür, dass das effektive Verhalten nicht nachhaltig ist. Falsche Preise und Strukturen, die dafür sorgen, dass Kosten und Erträge nachhaltigen Verhaltens an unterschiedlichen Orten anfallen, sorgen für Probleme. Darüber hinaus gibt es eine größere Zahl weiterer Barrieren, die eher in den Entscheidenden selbst zu suchen sind. Ungenügendes Wissen, verzerrte Wahrnehmungen, Unsicherheit, Trägheit, Rebound-Effekte, Zeit- und Risikopräferenz sowie Liquiditätsbeschränkungen spielen eine zentrale Rolle. Adäquate ökonomische Anreize, bessere Institutionen sowie vor allem soziale Innovationen, die der Bedeutung sozialer Netzwerke genügend Platz einräumen, könnten für einen nachhaltigeren Umgang mit den Ressourcen der Erde sorgen.

Abstract

Natural resources should be depleted and used in a sustainable way so that present and future generations can reach their desired welfare levels. This would not be the case if we continue with unlimited global warming, relying on fossil-fuel based energy systems, if we over-exploit global common goods like land and oceans or exhaust non-renewable minerals and ore in a non-sustainable way. From a technological point of view we could behave in a much more sustainable manner. However, sustainable technologies are hardly implemented. This seems not to be caused by a lack of sustainable values. On the contrary: all over the world many people seem to have strong preferences for sustainable strategies. Yet, due to the economic and institutional framework the factual behavior is far from being sustainable. Wrong prices are key obstacles as well as structures according to which people bearing costs of behaving more sustainably are not receiving the corresponding benefits. Further barriers are in the decision-makers themselves, like incomplete knowledge, perception biases, uncertainty, inertia, rebound effects, time and risk preference or liquidity constraints. The sustainable use of natural resources could be improved by adequate economic incentives, appropriate institutions and social innovations considering the importance of social networks.

1. Ausgangspunkt: Wertewandel und Verhaltensänderungen sind notwendig

Die Notwendigkeit eines global nachhaltigen Umgangs mit den natürlichen Ressourcen der Erde scheint heutzutage außer Frage zu stehen. Nachhaltigkeit bedeutet dabei, dass die Menschheit mit den Ressourcen der Erde so umgeht, dass die heute lebenden Generationen aus der Nutzung der Ressourcen einen möglichst hohen Nutzen ziehen, zugleich aber auch sicherstellt, dass möglichst viele Optionen für künftige Generationen erhalten werden, damit diese ein aus ihrer Sicht „gutes Leben“ gemäß ihren eigenen Vorstellungen führen können. Wie ein solches Leben künftig aussehen soll, ist aus heutiger Sicht nicht zu sagen. Daher müssen genügend viele Optionen in Zukunft verfügbar sein.

Ganz konkret sind wir heutzutage etwa mit der Nachhaltigkeitsthematik konfrontiert, wenn es darum geht, eine globale Erwärmung von mehr als 2 °C zu vermeiden, was ohne einen raschen und starken Rückgang der Treibhausgasemissionen weltweit nicht möglich zu sein scheint. Ein solcher Rückgang kann nur dann gelingen, wenn weltweit weniger fossile Energieträger, wie Kohle, Öl oder Gas, zum Zwecke der Energiegewinnung verbrannt werden. Wichtig wäre auch eine Umstellung der Ernährung derart, dass weltweit weniger Fleisch – insbesondere von Methan emittierenden Tieren – gegessen wird (FAO 2006). Gelingt es nicht, den globalen Temperaturanstieg unter 2 °C zu halten, würde man in den Bereich eines „gefährlichen Klimawandels“ geraten, mit drastischen Dürre- oder Starkregenereignissen, die Ernten vernichten und landwirtschaftliche Aktivitäten generell erschweren würden, so dass in der Folge eine ausreichende Welternährung nicht mehr sichergestellt wäre (SOLOMON et al. 2007, PARRY et al. 2007). Dieser Effekt würde dadurch verstärkt, dass ein hohes Maß an CO₂-Emissionen für eine Versauerung der Meere sorgt, die sich nicht zuletzt im Absterben von Korallen und in erheblichen Biodiversitätsverlusten im Meer niederschlagen würde (WBGU 2006). Das Ausmaß gesundheitlicher Beeinträchtigung durch sogenannte „vector-borne diseases“ würde im Zuge der globalen Erwärmung stark zunehmen, und wegen erheblicher Migrationsbewegungen als Folge unwirtlicher Lebensbedingungen dürften politische und religiöse Konflikte zunehmen (PARRY et al. 2007, WBGU 2007). Die Vermeidung einer starken globalen Erwärmung wäre also überaus wünschenswert, scheint aber ohne die oben erwähnten Änderungen und ohne einige weitere Verhaltensänderungen nicht realistisch zu sein. Gerade wenn man an Verhaltensänderungen im Ernährungsbereich denkt, wird deutlich, dass die erforderlichen Veränderungen im Verhalten nur dann möglich sein dürften, wenn es auch zu einer Veränderung der Werte und Einstellungen der Menschen kommt.

Solche Veränderungen sind auch im Zusammenhang mit der Vermeidung der Übernutzung globaler Gemeinschaftsgüter dringend erforderlich. „Global Commons“, wie Land und Meer, sollten jederzeit so genutzt werden, dass keine irreversiblen Schäden an den entsprechenden Ökosystemen verursacht werden, die die Nutzungsmöglichkeiten künftiger Generationen beeinträchtigen würden. Vergleicht man die angestrebte nachhaltige Landnutzung mit den gegenwärtigen Landnutzungspraktiken, stellt man fest, dass die landwirtschaftlichen Produktionstechniken in vielen Ländern anzupassen wären und sich auch die Verbrauchsgewohnheiten in den meisten Ländern deutlich verändern müssten. Statt der Herstellung möglichst vieler, möglichst billiger Agrarprodukte sollte aus Nachhaltigkeits-sicht die Erzeugung derjenigen Produkte vorgezogen werden, die die natürlichen Ökosysteme möglichst wenig schädigen. In der Regel dürften die Preise nachhaltig erzeugter Produkte höher sein als die der nicht-nachhaltig erzeugten. Für die Meere gilt, dass die gegen-

wärtig beobachtbare Überfischung zu vermeiden ist und man auf eine nachhaltige Nutzung der Meere zurückkommen sollte, will man auf Dauer die Versorgung einer tendenziell wachsenden oder zumindest nicht schrumpfenden Weltbevölkerung mit Fisch und Fischereiprodukten ermöglichen. Der Überfischung Einhalt zu gebieten, bedeutet, dass Fischereifirmen ihre gegenwärtigen Fangpraktiken ändern müssen und dass auch Konsumentinnen und Konsumenten bereit sein müssen, für nachhaltig produzierten Fisch höhere Preise zu zahlen.

Um gerade in ärmeren Ländern, in denen die Ernährung eines großen Teils der Bevölkerung aus Fisch und Fischereiprodukten besteht, dafür zu sorgen, dass es trotz höherer Preise nicht zu Ernährungsengpässen kommt, insbesondere wenn auch andere nachhaltig erzeugte Nahrungsmittel teurer werden, sind zusätzliche Einkommensmöglichkeiten zu schaffen. Dies wiederum setzt voraus, dass Produkte, die in ärmeren Ländern hergestellt werden, von den Absatzmärkten in anderen Ländern nicht durch Zoll- oder andere Barrieren fern gehalten werden. Derartige Veränderungen im Bereich der Politik dürften nur dann realistisch sein, wenn die zugrunde liegenden Verhaltensweisen und Werte andere werden. Nur eine Vielzahl geänderter Verhaltensweisen und vorgelagert geänderter Werthaltungen können also im Zusammenhang mit der Nutzung von *Global Commons* zu mehr Nachhaltigkeit führen.

Wie schon kurz erwähnt, bedeutet mehr globale Nachhaltigkeit auch, dass die Energieversorgung der Zukunft in drastisch geringerem Ausmaß auf fossilen Energieträgern und in entscheidend größerem Ausmaß auf erneuerbaren Energieträgern beruhen sollte. Mit Blick auf die kurz- und langfristigen Gefährdungspotenziale der Nuklearenergie sowie im Hinblick darauf, dass sich die gesellschaftlichen Kosten dieser Energieform bisher nicht annähernd in den Preisen nuklear erzeugten Stroms widerspiegeln und eine entsprechende Internalisierung der Kosten vermutlich das ökonomische Aus für diesen Pfeiler des Energiesystems bedeuten würde, wird deutlich, dass in global nachhaltigen Energiesystemen nicht nur für fossile, sondern auch für nukleare Energieerzeugung kein Platz mehr ist. Bei den erneuerbaren Energieträgern dürfte künftig neben der Windenergie, die gerade in Deutschland schon eine wichtige Rolle spielt, vor allem auch der Solarenergie große Bedeutung zukommen (*WBGU* 2003, 2011). Die Umstellung von den bisherigen hin zu global nachhaltigen Energiesystemen erfordert eine Vielzahl von Verhaltensänderungen. Energieversorger müssen sich umstellen, Investoren müssen mehr Kapital in den Ausbau erneuerbarer Energien stecken, die staatliche Energiepolitik muss klare Rahmenbedingungen setzen, und die Verbraucherinnen und Verbraucher müssen für eine Übergangszeit höhere Energiepreise hinnehmen und sich hieran in geeigneter Form anpassen (*WBGU* 2011, 2012). Nur wenn genügend viele Akteure ihre bisherigen Verhaltensweisen in genügend starker Form verändern, und nur wenn die Nachhaltigkeit der Energiesysteme zunehmend auch einen Wert an sich bekommt, wird die globale Nachhaltigkeit (im Energiebereich) eine Chance haben.

Ein weiterer Aspekt globaler Nachhaltigkeit bezieht sich auf den Abbau nicht erneuerbarer Mineralien und Erze. Dieser Abbau sollte in ökonomisch, ökologisch und sozial nachhaltiger Form erfolgen. Das Beispiel seltener Erden, die im Wesentlichen in China unter ökologisch und sozial vergleichsweise wenig nachhaltigen Umständen gefördert werden, macht deutlich, dass auch in diesem Bereich globale Nachhaltigkeit nur um den Preis von Verhaltensänderungen vieler Akteure zu erreichen ist. Firmen, die Rohstoffe abbauen, müssten stärker auf die Nachhaltigkeit achten; Staaten müssten einen Ordnungsrahmen so setzen, dass ein nicht nachhaltiger Abbau sanktioniert werden kann; zusätzliche Inves-

toren müssten attraktive Rendite-Risiko-Verhältnisse vorfinden und dann ihr Kapital entsprechend einsetzen, und nicht zuletzt die Konsumentinnen und Konsumenten müssten bereit sein, für nachhaltig abgebaute nicht erneuerbare Mineralien und Erze einen höheren Preis zu zahlen. Der Nachhaltigkeit des Ressourcenabbaus ist also ein Wert zu geben, und die Verbrauchsgewohnheiten sind höheren Preisen entsprechend anzupassen. Dies gilt im Übrigen ganz generell für den Abbau nicht erneuerbarer natürlicher Ressourcen, und zwar nicht zuletzt deswegen, weil die Gefahr einer „zu frühen“ Erschöpfung der Ressourcenvorräte besteht. „Zu früh“ bedeutet dabei, dass für die Befriedigung derjenigen Bedürfnisse, für die man bisher bestimmte nicht erneuerbare Ressourcen verwendete weder andere Ressourcen noch andere Technologien in ausreichendem Maß bereitstehen, so dass die Bedürfnisse der heutigen Generationen nicht mehr befriedigt werden können und die der künftigen Generationen möglicherweise ebenfalls nicht.

Die Liste von für die Nachhaltigkeit wichtigen Bereichen ließe sich fortsetzen, das Grundphänomen bleibt jedoch bestehen: Will man künftigen Generationen möglichst viele Optionen erhalten, damit diese nach ihren eigenen Vorstellungen ein „gutes Leben“ führen können, weiß jedoch nicht, welche Werte oder Vorstellungen künftig wichtig sind, müssen wir heute versuchen, möglichst wenige irreversible Entscheidungen zu treffen. Wir sollten uns für die globale Nachhaltigkeit der Energiesysteme, der Nutzung von *Global Commons* und des Ressourcenabbaus einsetzen. Mehr globale Nachhaltigkeit wird jedoch nur erreichbar sein, wenn es zu technischen, ökonomischen, institutionellen und auch gesellschaftlichen Innovationen kommt. Voraussetzung für die Durchsetzung solcher Innovationen, insbesondere, aber nicht nur der gesellschaftlichen oder sozialen Innovationen ist, dass es bei nahezu allen beteiligten Akteuren zu signifikanten Wert- und Verhaltensänderungen kommt. Unter welchen Voraussetzungen ist nun hiermit zu rechnen?

2. Technische Machbarkeit als Voraussetzung für Verhaltensänderungen

Soll Energie künftig nicht mehr fossil oder nuklear gewonnen werden, und soll es dabei nicht zu massiven Einbrüchen in der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit von Ländern kommen, so ist sicherzustellen, dass die technologischen Voraussetzungen für eine solche Veränderung der Energiesysteme, hin zu mehr Nachhaltigkeit, gegeben sind. Es muss also ausreichende Möglichkeiten geben, Strom regenerativ zu gewinnen, in Netze einspeisen und transportieren zu können, und schließlich sollten solche nachhaltigen Energiesysteme auch genügend stabil sein. Auch wenn von der technischen Seite her noch einiges Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Energiesystemen vorhanden ist, kann man doch davon ausgehen, dass heute bereits die technischen Möglichkeiten für global nachhaltigere Energiesysteme gegeben sind. Die Veränderung von Werten und von Verhalten scheint jedenfalls sehr viel eher der Engpass für mehr Nachhaltigkeit der Energiesysteme zu sein als die technische Machbarkeit.

Ähnliches gilt auch für die nachhaltige Nutzung von Land und Meer. Auch hier gibt es bereits einige technologische Entwicklungen, die auf ihre Umsetzung warten, wie etwa ökologisch bessere Bewässerungsmethoden oder der Einsatz besseren Fanggeräts in der Fischerei. Die Technik für eine nachhaltigere Land- bzw. Meeresnutzung wäre grundsätzlich vorhanden. Ob die Technologien aber tatsächlich eingesetzt werden oder nicht, hängt entscheidend von Veränderungen in den Werten und Verhaltensweisen verschiedenster Akteure ab.

Auch beim Abbau von nicht erneuerbaren Mineralien und Erzen könnte man inzwischen durchaus auf modernere und ökologisch wie auch sozial nachhaltigere Technologien zurückgreifen. Der Abbau seltener Erden könnte zum Beispiel durch den verstärkten Einsatz von Robotern sozial nachhaltiger betrieben werden, was jedoch höhere Kosten mit sich brächte. Solange allerdings ein Land in quasi monopolistischer Weise den Ressourcenabbau betreibt und weder andere Länder noch andere Akteure aufgrund geänderter Werte oder Verhaltensweisen für Konkurrenz und den Einsatz anderer, verfügbarer und nachhaltiger Technologien sorgen, darf man in diesem Bereich wohl kaum auf globale Nachhaltigkeit hoffen.

Es sind also in erster Linie nicht technologische Engpässe, die einen global nachhaltigeren Umgang mit natürlichen Ressourcen verhindern. Vielmehr scheinen ein fehlender Wertewandel bzw. das Fehlen von Veränderungen im Verhalten vieler Akteure beim Umgang mit natürlichen Ressourcen ausschlaggebende Hemmnisse zu sein.

3. Gibt es einen Wertewandel in Richtung auf mehr Nachhaltigkeit?

Spricht man von Werten, meint man damit in der Regel die von einer größeren Anzahl von Personen „geteilten Auffassungen“ von Wünschenswertem (KLUCKHOHN 1951). Dabei ist zwischen individuellen und gesellschaftlichen Werten zu unterscheiden, je nachdem ob es sich beim „Wünschenswertem“ um Ziele von Einzelpersonen oder kleineren Gruppen (wie etwa Familien) handelt oder um Ziele von Gesellschaften insgesamt. Während zu individuellen Werten etwa persönliche Anerkennung, persönliche Sicherheit, Harmonie oder Gelassenheit gehören, zählen zu den gesellschaftlichen Werten Toleranz, Solidarität, Gerechtigkeit, aber auch Wachstum oder Nachhaltigkeit (SCHWARTZ 1992, ROKEACH 1973).

Wertewandel bezeichnet allmähliche Veränderungen von Werthaltungen einzelner Individuen, die sich schließlich in einer Veränderung von gesellschaftlichen Werten manifestiert. In jüngerer Zeit wurde das Phänomen des Wertewandels vor allem von Ronald F. INGLEHART thematisiert und analysiert. INGLEHART beschäftigte sich in mehreren Standardwerken vor allem mit dem intergenerationellen Vordringen postmaterieller Einstellungen nach dem Zweiten Weltkrieg (INGLEHART 1971, 1977, 1998, 2008). Er unterschied dabei materialistische Werte wie individuelle Leistungen, Sicherheit, sozialen Aufstieg oder auch Prestige und sogenannte „post-materialistische“ Werte wie z. B. Selbstentfaltung, Lebensqualität, Emanzipation oder auch gesellschaftliche Partizipation (INGLEHART 1971). INGLEHART machte deutlich, dass dieser Wandel der Werte vor allem durch die Zunahme des Wohlstandsniveaus in den entsprechenden Ländern ausgelöst ist. Im Zuge eines höheren ökonomischen Wohlstands können sich Individuen immer mehr ihrer eigenen Weiterentwicklung und Entfaltung zuwenden und müssen immer weniger Energie ihres Lebens für die pure Einkommenserzielung verwenden. Neben hoher Sicherheit hinsichtlich der Befriedigung der ökonomischen Grundbedürfnisse ist gemäß INGLEHART auch politische Stabilität wesentlich für den Übergang von materialistischen zu postmaterialistischen Werten. In seiner Arbeit von 2008 bestätigte INGLEHART nochmals den Übergang von materialistischen zu postmaterialistischen Werten in ausgewählten westeuropäischen Ländern. Er wies besonders darauf hin, dass sich der Wertewandel langsam vollziehe, und zwar in der Regel so, dass jüngere Generationen durch andere Werte gekennzeichnet seien als ältere und dass der Wertewandel in der Gesellschaft insgesamt vor allem dann feststellbar ist, wenn jün-

gere Generationen mit ihren veränderten Werten ältere Generationen mit ihren tradierten Werten ersetzen.¹ INGLEHART betont auch, dass seit den 1970er Jahren Generationen, die in jungem Alter durch postmaterialistische Werte gekennzeichnet waren, diese Werte auch beibehielten, wenn sie älter wurden.² Für Deutschland und andere westeuropäische Länder zeigt seine Analyse über den Zeitraum von 1970 bis 2006, dass der Anteil von Menschen mit postmaterialistischen Werten bezogen auf die Gesamtbevölkerung kontinuierlich anstieg.³ Auch die neueren Untersuchungen von INGLEHART identifizieren ökonomische und politische Sicherheit als Kernursachen für den Wertewandel.⁴ Aktuelle empirische Erhebungen werden mittlerweile vor allem vom *World Value Survey* (WVS) durchgeführt und veröffentlicht. Das WVS ist ein umfangreicher globaler Datensatz zu Werten und zum Wertewandel, der maßgeblich von INGLEHART und seinen theoretischen Überzeugungen geprägt wurde. Seit 1981 wurden mehr als 330 000 Personen in 97 Ländern nach ihren Werten befragt. Pro Land und pro Erhebungswelle (nach jeweils 5 bzw. 10 Jahren werden die Umfragen wiederholt) werden jeweils 1000 bis 3500 standardisierte *Face-to-face*-Interviews durchgeführt. Die Auswahl der Interviewpartner erfolgt dabei so, dass die jeweilige Stichprobe als repräsentativ angesehen werden kann. Die Fragebogen des *World Value Surveys* enthalten ca. 250 Fragen, die die Messung von 400 bis 800 unterschiedlichen Variablen ermöglichen (WVS 2008, RÖSSEL 2006). Die zurzeit jüngsten veröffentlichten Daten stammen aus der in den Jahren 2005 bis 2008 durchgeführten 5. Erhebungswelle. In den Jahren 2011 und 2012 wurde die aktuellste Erhebungswelle realisiert, deren Ergebnisse aber noch nicht vorliegen (WVS, www.worldvaluessurvey.org).

Neben den Daten des WVS gibt es auch einige weitere empirische Studien zur Ermittlung von Werten. Eine besonders bekannte ist etwa das Eurobarometer, das bereits seit 1973 Meinungsumfragen zu Werten und Einstellungen der Menschen (sowie zu anderen Themen) in EU-Ländern durchführt. Die Eurobarometer-Umfragen werden von der Europäischen Kommission in Auftrag gegeben und stellen eine Mischung aus immer wieder denselben Fragen und aus neuen Fragen dar. Pro EU-Mitgliedsstaat werden halbjährlich ca. 1000 Personen befragt (Europäische Kommission 2013).

Sowohl WVS als auch Eurobarometer beinhalten interessante Aussagen zur Veränderung von Werten im Umweltbereich. Der Trend scheint generell in Richtung auf einen Bedeutungsgewinn der Nachhaltigkeit zu gehen. So hat sich etwa in der Europäischen Union (EU) der Umweltschutz als „eine von drei Maßnahmen, die die EU vorrangig behandeln sollte“ von einer Zustimmungsrate von 19% im Jahr 2005 auf 33% im Jahr 2008 gesteigert (Eurobarometer 2005, 2006, 2007, 2008). Bei vielen umweltfreundlichen Aktivitäten konnte von 2007 bis 2011 eine Zunahme der Beteiligungsrate der Bevölkerung in den EU-Ländern festgestellt werden (vgl. Abb. 1).

In Deutschland war gemäß einer Studie des Bundesumweltministeriums, die zwischen November 2011 und Januar 2012 durchgeführt wurde, eine hohe Akzeptanz von Investitionen für die Energiewende festzustellen. 87% der Befragten unterstützten den Bau von Windparks im Meer, 79% den Bau von Windrädern an Land und 77% den Bau von Solaranlagen außerhalb von Siedlungen. Allerdings schien diese Akzeptanz etwas halbherzig zu

1 INGLEHART 2008, S. 132.

2 INGLEHART 2008, S. 135.

3 INGLEHART 2008, S. 137.

4 INGLEHART 2008, S. 137f.

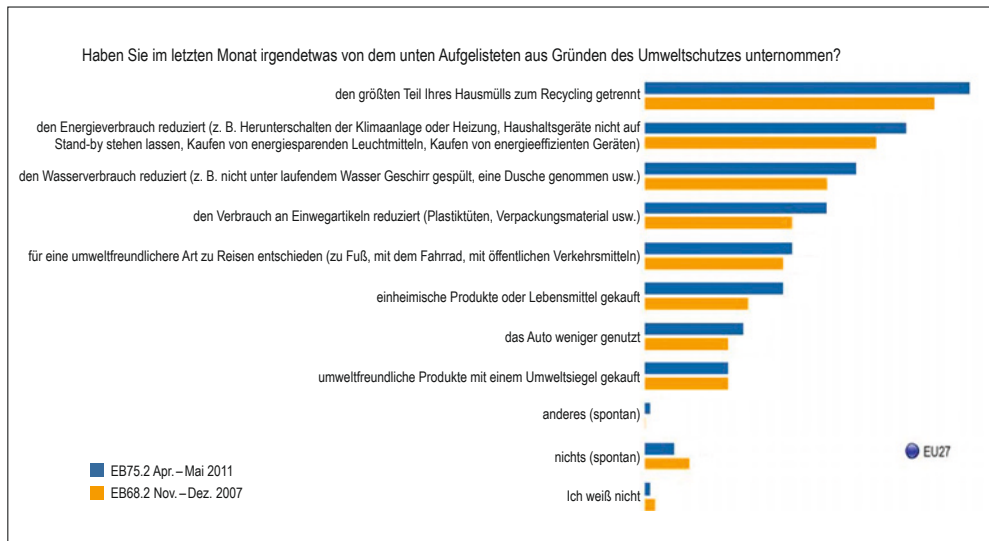


Abb. 1 Veränderungen im Umweltverhalten 2007/2011 (Quelle: SPECIAL EUROBAROMETER 365, Attitudes of European citizens towards the environment, S. 65; http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_365_en.pdf, modifiziert)

sein: Nur 42% der Befragten waren auch bereit, den Bau neuer Hochspannungsleitungen zur unterstützen, und nur 35% würden einen zusätzlichen Holzeinschlag in Wäldern zum Bau solcher Leitungen befürworten (*Welt-Online* 2012a, b, KNAPP 2012, *BMU/BfN* 2012).

Mit Hilfe des Sozioökonomischen Panels konnte im Übrigen gezeigt werden, dass Westdeutsche zwischen 1986 und 2006 deutlich mehr zu Postmaterialisten wurden, und dass Ostdeutsche zwischen 1998 und 2008 ebenfalls in starkem Ausmaß postmaterialistische Werte übernahmen, so dass heutzutage kein wesentlicher Unterschied mehr in den Werten von Ost- und Westdeutschen besteht.⁵ Als Hauptursache für die Zunahme postmaterialistischer Werthaltungen ist die Erhöhung des Wohlstandsniveaus anzusehen (INGLEHART 1971). Studien des Sinus-Instituts (heute: Sinus Sociovision) machen deutlich, dass ökologische Werte zwischen Anfang der 1980er und Mitte der 1990er Jahre zunehmend in die Mitte der Gesellschaft vordrangen (WIPPERMANN 2005). Während solche Werte vor 1980 in Deutschland eher randständig waren und einem Milieu von Protest zuzuordnen waren, bewegte sich das Thema Ökologie und damit ein zentrales Element der Nachhaltigkeitswerte in die Mitte der Gesellschaft und entwickelte sich gar zu einer sozialen Norm (WIPPERMANN 2005). Naturschutz und Nachhaltigkeit fanden ab Mitte der 1990er Jahre zunehmend Eingang in Wirtschaft und Verwaltung sowie ins Bildungssystem. Aktuell lässt sich feststellen, dass eine positive Grundhaltung gegenüber Nachhaltigkeitswerten in der deutschen Gesellschaft insgesamt vorhanden ist, dass jedoch manche Bevölkerungsgruppen, Institutionen oder auch Firmen diese Werte sehr viel stärker verkörpern als andere. Es zeigt sich weiter, dass Individuen selbst bei Vorhandensein der entsprechenden Nachhaltigkeitswerte ihr tatsächliches Handeln häufig nicht ausschließ-

⁵ KROH 2008, S. 480.

lich an diesen Werten orientieren. Dies kann – bleibt man auf der Ebene der Werte – auf Widersprüche zu einem Wert wie „kultivierter Lebensstil“ oder zu Hobbys (wie etwa Reisen) zurückgeführt werden (GRUNERT et al. 1997). Trotz der Bedeutung solcher anderer Werte ist jedoch bei einer Vielzahl von Deutschen ein grundlegender „ökologischer Impuls“ zu beobachten, der ihr Handeln zumindest mitbestimmt (WIPPERMANN 2005).

Generell zeigt sich, dass die persönliche Einschätzung der Bedeutung des Umweltschutzes in den verschiedenen EU-Ländern stark variiert (vgl. Abb. 2): Während in Zypern, Malta und Schweden über 80% der Bevölkerung den Schutz der Umwelt für sehr wichtig halten, sind es in Polen, Finnland und Österreich unter 50%.

Ähnliches gilt auch weltweit. Während manche Länder wie etwa Japan, Argentinien oder Schweden den Klimawandel als ernstes oder sehr ernstes globales Umweltproblem betrachten, ist diese Sichtweise in Thailand, Kolumbien oder Sambia wesentlich schwächer, allerdings doch immer noch deutlich ausgeprägt (WVS 2009). Bei der Frage, ob

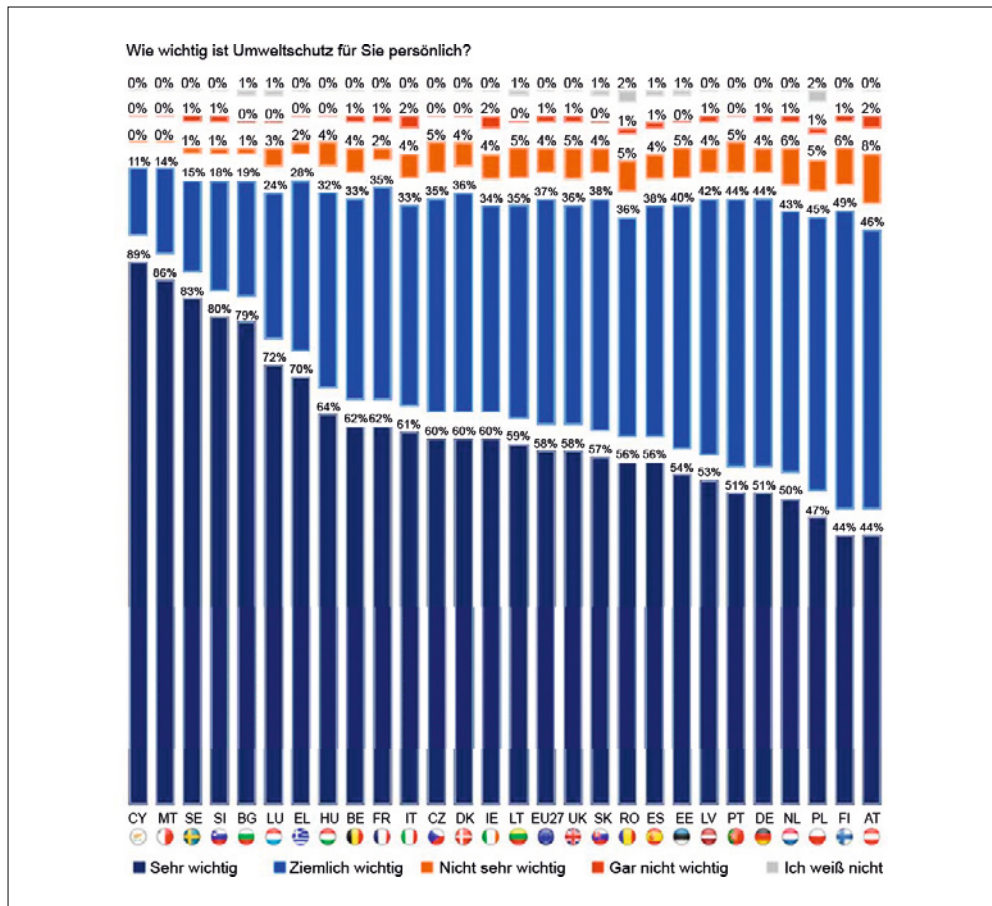


Abb. 2 Bedeutung des Umweltschutzes für EU-Bürger (2012) (Quelle: SPECIAL EUROBAROMETER 365, Attitudes of European citizens towards the environment, S. 9; http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_365_en.pdf, modifiziert)

Umweltschutz oder Wirtschaftswachstum wichtiger sei, findet sich in den meisten Ländern eine knappe oder sogar deutliche Priorität für den Umweltschutz. In einigen Ländern, zu denen neben Thailand, Polen, Südkorea und anderen auch Deutschland gehört, dominiert allerdings das Ziel des Wirtschaftswachstums (*WVS* 2009). Gemäß einer Emnid-Umfrage im Jahr 2010 hatte der Schutz der natürlichen Umwelt in Deutschland einen mittleren Stellenwert. 56% der Bevölkerung fanden dieses Ziel für ihre persönliche Lebensqualität wichtig. Gesundheit, intakte Familie und Partnerschaft, Selbstbestimmung des Lebens und ein friedliches Zusammenleben mit anderen Menschen sowie ein entsprechendes soziales Engagement wurden jedoch von einem (deutlich) größeren Anteil der deutschen Bevölkerung als wichtig für die Lebensqualität eingestuft (*Bertelsmann-Stiftung* 2010).

Über die verschiedenen europäischen Länder hin hat zwischen 1990 und dem Jahr 2000 die zustimmende Haltung zu staatlichen Maßnahmen gegen die Verschmutzung der Umwelt im Durchschnitt zugenommen bzw. die ablehnende Haltung abgenommen (vgl. Tab. 1). Schweden, Großbritannien und einige wenige andere Länder bildeten allerdings Ausnahmen.

Tab. 1 Wertewandel in Europa (Quelle: *Data: World Values Survey*: <http://www.wvsevsdb.com>; eigene Berechnungen). Veränderung der Zustimmung zur Aussage: „Es ist Sache der Regierung, etwas gegen die Umweltverschmutzung zu tun.“

Land	Veränderung in %-Punkten zwischen 1990 und 2000			
	Stimme sehr zu	Stimme zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
Österreich	-1,50%	4,20%	-1,50%	-1,10%
Belgien	3,70%	-3,40%	-0,70%	0,40%
Tschechische Republik	5,50%	10,20%	-9,20%	-6,50%
Dänemark	2,50%	-1,50%	-2,50%	1,40%
Finnland	-2,50%	14,70%	-5,60%	-6,70%
Frankreich	19,10%	-8,70%	-9,90%	-0,60%
Deutschland	4,30%	5,20%	-8,20%	-1,30%
Island	0,60%	4,30%	-0,90%	-4,00%
Irland	13,40%	-3,70%	-10,50%	0,80%
Italien	-0,30%	1,40%	-1,70%	0,60%
Niederlande	0,30%	3,40%	5,70%	-9,40%
Portugal	-33,10%	16,70%	15,10%	1,30%
Spanien	15,80%	-0,70%	-13,60%	-1,40%
Schweden	-1,40%	8,40%	7,20%	-14,20%
Großbritannien	13,10%	7,80%	-17,70%	-3,10%

Ähnliche Effekte sind auch in anderen Teilen der Welt beobachtbar (vgl. Tab. 2), wobei allerdings China mit einem deutlichen Anstieg der ablehnenden Haltungen und einem deutlichen Rückgang der Zustimmung eine Ausnahme darstellt.

Tab. 2 Wertewandel in anderen Regionen (Quelle: Data: World Values Survey: <http://www.wvsevsdb.com> (eigene Berechnungen). Veränderung der Zustimmung zur Aussage: „Es ist Sache der Regierung, etwas gegen die Umweltverschmutzung zu tun.“

Land	Veränderung in %-Punkten zwischen 1990 und 2000			
	Stimme sehr zu	Stimme zu	Stimme nicht zu	Stimme überhaupt nicht zu
Argentinien	14,90 %	-0,40 %	-12,10 %	-2,50 %
Kanada	8,20 %	2,20 %	-11,30 %	0,90 %
Chile	26,40 %	-10,50 %	-12,80 %	-3,00 %
Mexiko	13,10 %	4,00 %	-14,80 %	-2,20 %
USA	7,60 %	-4,20 %	-3,90 %	0,40 %
China	-8,70 %	-1,80 %	10,30 %	0,10 %
Indien	-0,70 %	3,50 %	-7,30 %	4,50 %
Japan	3,80 %	-4,20 %	0,30 %	0,10 %
Republik Korea	-2,50 %	18,90 %	-7,50 %	-9,00 %

Generell zeigt sich, dass die Werthaltungen der Bevölkerung in einzelnen Ländern umso stärker zugunsten von Nachhaltigkeit, beispielsweise in Form von umweltschützenden Maßnahmen, ausfallen, je höher das Pro-Kopf-Einkommen der Bevölkerung ist (FRANZEN und MEYER 2004). Und auch innerhalb von Ländern mit einem bestimmten Pro-Kopf-Einkommen zeigen sich nochmals Unterschiede in der Einstellung bezüglich der Nutzung der Ressourcen der Erde. Tendenziell haben junge, weibliche, gut ausgebildete und liberal eingestellte Personen mit hohem Einkommen eine besonders große Wahrscheinlichkeit dafür, dass sie durch nachhaltige Werte gekennzeichnet sind. Außerdem scheinen kleinere Privathaushalte über nachhaltigere Werte zu verfügen als größere.⁶

Eine 2012 veröffentlichte Studie untersuchte die Akzeptanz verschiedener staatlicher Maßnahmen des Umweltschutzes in einer fiktiven nationalen Abstimmung. Die Studie bezieht sich auf Bangladesch, Deutschland, Finnland, Österreich, Norwegen und die USA. Die Ergebnisse der Studie legen nahe, dass umweltpolitische Maßnahmen umso eher akzeptiert werden, je weniger direkte Kosten und Verhaltensänderungen für einzelne Individuen damit verbunden sind (BOSTROM et al. 2012).

Tab. 3 Akzeptanz in anderen Regionen (Länder: Österreich, Bangladesch, Finnland, Deutschland, Norwegen, USA) (Quelle: BOSTROM et al. 2012)

Für welche Maßnahme würden Sie in einer nationalen Abstimmung votieren?	Ja	Nein	Indifferent (in %)
Auto-Motoren mit geringerem Benzinverbrauch	76	13	11
Höhere Steuern für Gas, Öl, Kohle, Kerosin	44	44	12
Internationaler CO ₂ -Markt	56	22	22
Forschung für erneuerbare Energien	93	3	4
Konsum generell einschränken	57	21	22

⁶ CIOCIRLAN und PETTERSON 2012, ABRAHAMSE und STEG 2009, BARR 2007, HUNTER et al. 2004, POORTINGA et al. 2003, SCHULTZ et al. 1995.

Die eben erwähnte Studie zeigt im Übrigen auch, dass eine deutliche Mehrheit der Befragten davon ausgeht, dass der globale Klimawandel wesentlich vom Menschen verursacht ist, und dass sie grundsätzlich staatliche Maßnahmen im Klimabereich befürworten.⁷

Fasst man die verschiedenen Ergebnisse kurz zusammen, ergibt sich der Eindruck, dass die Bevölkerungen in vielen Ländern weltweit durchaus starke Präferenzen für nachhaltiges Wirtschaften haben. Außerdem scheinen die Präferenzen für Nachhaltigkeit (vor allem im ökologischen Sinn) über die letzten drei Jahrzehnte hin stärker geworden zu sein. Das beobachtbare faktische Verhalten vieler Akteure scheint jedoch mit diesen Werten und Präferenzen nicht übereinzustimmen. Und insbesondere dann, wenn Wertänderungen auch Verhaltensänderungen implizieren würden, scheint die Zustimmungsrate eher tief zu sein. Wie lässt sich diese Diskrepanz zwischen Werten und Verhalten erklären?

4. Werte und Handeln – Mögliche Gründe für eine Diskrepanz

Fragt man nach Gründen für die offenbar vorhandene Diskrepanz zwischen Werten und Handeln im Bereich Nachhaltigkeit, kommen prinzipiell drei verschiedene Ursachen in Frage. Als erstes könnte man vermuten, dass die in den Umfragen, insbesondere auch im *World Value Survey* ausgewiesenen Werte zugunsten der Nachhaltigkeit verzerrt sind und die „echten“ Werte weniger stark in Richtung Nachhaltigkeit gehen. Dies könnte der Fall sein, wenn bzw. weil beim Abfragen der Werte Rahmenbedingungen, wie etwa die Tatsache, dass staatliche Maßnahmen zugunsten des Umweltschutzes auch Kosten für einzelne Haushalte bedeuten, zu wenig beachtet wurden. Aufgrund der Dokumentationen zu den Befragungen ist jedoch nicht davon auszugehen, dass derart begründbare Verzerrungen eine wesentliche Rolle spielen. Es kann und soll hier also durchaus angenommen werden, dass die in den Umfragen erhobenen Werte „echt“ sind.

Geht man von „echten“ Werten zugunsten von Nachhaltigkeit aus, könnte eine zweite Ursache für die Diskrepanz zwischen Werten und Handeln darin liegen, dass die ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen dergestalt sind, dass trotz des Wunsches nach nachhaltigem Verhalten das effektive Verhalten nicht nachhaltig sein kann. Bei den ökonomischen Rahmenbedingungen spielen beispielsweise die Energiepreise eine wichtige Rolle. Solange die Preise für Strom aus fossilen und nuklearen Energieträgern eher niedrig sind, weil nämlich die negativen Externalitäten der Nutzung fossiler Energieträger nicht internalisiert sind und weil fossile, aber auch nukleare Energieträger häufig staatlich subventioniert sind, ist kein ökonomischer Anreiz für einen Wechsel von konventionellen zu erneuerbaren Energieträgern und auch kein Anreiz zu sparsamem oder effizientem Umgang mit Strom vorhanden. Als Beispiel für die Bedeutung institutioneller Rahmenbedingungen kann das sogenannte Mieter-Vermieter-Problem dienen (HOUSER et al. 2009, LEVINSON und NIEMANN 2004). Dabei geht es darum, dass gemietete Wohnungen und Häuser häufig mit einem vom Vermieter bestimmten Heizsystem sowie mit Elektrogeräten im Küchenbereich ausgestattet sind, die ebenfalls vom Vermieter ausgesucht wurden. Da der Vermieter die Anschaffungskosten, nicht jedoch die laufenden Kosten dieser Geräte und Systeme trägt, besteht der Anreiz, Geräte und Systeme mit einem tiefen Beschaffungspreis zu wählen. Häufig sind dies aber gerade nicht die ökologisch effizienten bzw. nachhaltigen

⁷ BOSTROM et al. 2012, S. 216 ff.

Geräte. Andererseits besteht aus Sicht der Vermieter kein Anreiz, sich für Geräte oder Systeme mit niedrigen laufenden Kosten zu entscheiden, weil sie die höheren Anschaffungskosten nicht auf die Mieter überwälzen können, so dass auch von dieser Seite her nicht zu erwarten ist, dass nachhaltige Geräte zum Einsatz kommen.

Eine weitere, dritte Ursache für das Auseinanderfallen von Werten und Handeln dürfte darin liegen, dass Präferenzen für Nachhaltigkeit durchaus vorhanden sind, aber durch eine Vielzahl weiterer Barrieren behindert werden, die über die genannten ökonomischen und institutionellen Barrieren hinausgehen und eher in den einzelnen Entscheidenden selbst zu suchen sind. Barrieren, die in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen, sind etwa ungenügendes Wissen der Akteure, Trägheit bzw. Scheu vor Veränderungen, Unsicherheit über das Verhalten anderer, Zeit- und Risikopräferenzen im Sinn der Bevorzugung der Gegenwart und der Aversion gegenüber Risiken, Liquiditätsbeschränkungen sowie generelle Wahrnehmungsverzerrungen. Gerade diese Wahrnehmungsverzerrungen manifestieren sich häufig darin, dass das von einzelnen Entscheidenden wahrgenommene Ertrag-Risiko-Verhältnis von Handlungen nicht mit dem tatsächlichen Verhältnis übereinstimmt und tendenziell zu tiefe Erträge und zu hohe Risiken einer (Investitions-)Entscheidung wahrgenommen werden (*WBGU* 2012, *SONNTAG-O'BRIEN* und *USHER* 2004).

Im Folgenden werden nun die zweite und vor allem die dritte Ursache für eine Diskrepanz von Nachhaltigkeitswerten und nicht nachhaltigem Handeln näher betrachtet, und es werden Wege aufgezeigt, wie diese Diskrepanz verkleinert werden kann und so ein wichtiger Schritt auf mehr Nachhaltigkeit im Umgang mit den Ressourcen der Erde gemacht werden kann.

5. Ökonomische und institutionelle Rahmenbedingungen

Ökonomische und institutionelle Rahmenbedingungen sind bisher in den meisten Ländern so beschaffen, dass keine Anreize für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen gesetzt werden. Die nationale und internationale Politik gibt dem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen keine Priorität und verbindliche, langfristig ausgerichtete Nachhaltigkeitspolitiken fehlen. Ansätze wie etwa die Energiestrategie in Deutschland zeigen einen Weg in die richtige bzw. erforderliche Richtung.

Wie bereits erwähnt wurde, sind etwa die Energie- bzw. Elektrizitätspreise weltweit überwiegend so niedrig, dass hiervon ungenügende Anreize zum Energiesparen und auch für technologische Innovationen, wie beispielsweise die stärkere Nutzung der Sonnenenergie ausgehen. Als Ursachen für die tiefen Energiepreise sind die Subventionen vieler Länder für fossile und nukleare Stromerzeugung, das Setzen von Höchstpreisen aus sozialpolitischen Gründen und auch die fehlende Internalisierung der gesellschaftlichen Kosten der Energieerzeugung in den Preisen zu nennen. Will man Akteure zu einem nachhaltigeren Verhalten veranlassen, wären also sämtliche Subventionen für nicht-nachhaltige Gewinnung oder Verwendung von Ressourcen abzubauen und negative Externalitäten der Gewinnung oder Verwendung von Ressourcen wären zu internalisieren. Hierfür kämen etwa nationale Steuern in Frage, u. a. z. B. eine CO₂-Steuer, die dafür sorgen würde, dass CO₂ einen Preis bekommt und auf diese Weise weniger massiv emittiert werden dürfte wie bisher. Auch andere Maßnahmen, etwa die Beschränkung nationaler CO₂-Emissionsrechte bei gleichzeitiger nationaler und internationaler Handelbarkeit dieser Rechte, würde CO₂

einen Preis geben und daher dafür sorgen, dass weniger CO₂-emittierende Aktivitäten gewählt würden.

Weiter könnte und sollte nachhaltiges Verhalten in einer Übergangsphase durch temporäre Fördermaßnahmen unterstützt werden. Hierzu würde etwa gehören, dass nachhaltige Investitionen durch besonders günstige Kredite gefördert werden, dass Risiken im Zusammenhang mit nachhaltigen Aktivitäten durch besonders günstige Versicherungen abgesichert werden oder dass Unternehmen bei der Markteinführung nachhaltiger Technologien staatlich unterstützt werden. Auch wären neue Geschäftsmodelle wie etwa ESCOs (*Energy Service Companies*) stärker zu propagieren, die beispielsweise dafür sorgen könnten, dass hohe Anfangskosten nachhaltiger Investitionen in kleine günstige Raten über einen längeren Zeitraum hin zerlegt werden (*WBGU* 2011, 2012). Auf diese Weise könnten etwa private Haushalte ein nachhaltigeres Heizungssystem in ihrem Haus nicht kaufen, sondern lediglich die monatlichen Wärmeleistungen beziehen und bezahlen. Im Übrigen wäre auch daran zu denken, dass diejenigen, die auf die Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen (etwa auf Fischfang in bestimmten Zonen) verzichten sowie diejenigen, die aktiv etwas zum Schutz von Ressourcen tun, also etwa ein Meeresschutzgebiet einrichten, eine (vorübergehende) Kompensation von staatlicher Seite erhalten. Die entsprechenden finanziellen Mittel könnten dabei aus nationalen, aber auch aus internationalen Quellen kommen. Eine internationale Finanzierung drängt sich vor allem bei Ressourcen auf, die – wie etwa die Ozeane – den Charakter globaler öffentlicher Güter haben.

Steigende Energiepreise sind wesentlich, um für mehr nachhaltige Entscheidungen im Umgang mit Ressourcen sorgen zu können. Sie beinhalten allerdings auch die Gefahr einer überproportional starken Belastung von Haushalten mit geringen Einkommen und sind daher durch geeignete Maßnahmen (beispielsweise Einkommenstransfers, Bezugsgutscheine o. ä.) sozial abzufedern. Derartige Abfederungen sind vor allem dann in Erwägung zu ziehen, wenn bzw. solange die Preiselastizität der Nachfrage nach den entsprechenden Ressourcen, beispielsweise für elektrischen Strom, sehr niedrig ist. Häufig ist dies nur während einer gewissen Übergangsphase der Fall, d. h. solange unter anderem aus technischen Gründen Substitutionen (noch) nicht möglich sind.

Wendet man sich den institutionellen Barrieren für nachhaltiges Handeln zu, ist es wichtig, darauf zu achten, dass diejenigen Akteure, die sich nachhaltig verhalten, direkt eine „Belohnung“, etwa in Form niedriger laufender Betriebskosten, bekommen. Häufig, wie bereits oben am Mieter-Vermieter-Problem aufgezeigt, ist dies nicht der Fall, so dass der Anreiz für nachhaltige Entscheidungen fehlt. In eine ähnliche Richtung geht die Feststellung, dass Konsumentinnen und Konsumenten grundsätzlich durchaus bereit wären, für einen nachhaltigen Abbau Seltener Erden einen höheren Preis zu zahlen. Da sie aber davon ausgehen, dass aufgrund des chinesischen Monopols ihre höhere Zahlungsbereitschaft „nicht am richtigen Ort“ ankommt, d. h. nicht wirklich einen nachhaltigeren Umgang mit den Ressourcen und der menschlichen Arbeitskraft garantiert, bleibt die faktische Zahlungsbereitschaft häufig niedrig (*ADEBAHR et al.* 2011).

Maßnahmen, die den hemmenden Effekt von Institutionen beseitigen können, würden bei verbindlichen nationalen und internationalen Politiken beginnen, die dem nachhaltigen Umgang mit Ressourcen klare Priorität einräumen. Weiter würden dazu u. a. eine nationale Besteuerung nicht-nachhaltiger Aktivitäten gehören, Ge- und Verbote (beispielsweise in Form einer Mindestquote von Hybrid-/Elektroautos an den Neuzulassungen von Autos, so wie dies in China praktiziert wird; *HAGENBÜCHLE* 2012), internationale Abkommen

und Kooperationen (beispielsweise in Form eines revidierten Seerechtsübereinkommens [SRÜ] oder eines wirksamen Abkommens im Stil des Kyoto-Protokolls), passende Infrastrukturen, Förderbanken usw. Sollen derartige Maßnahmen den gewünschten Effekt haben, braucht es in allen Ländern weltweit einerseits einen starken gestaltenden Staat, andererseits aber auch genügend Platz für eine starke und engagierte Bürgerbeteiligung (WBGU 2011). Je internationaler die entsprechenden Maßnahmen sein sollen, desto schwächer sind typischerweise die Instrumente, da der kleinste gemeinsame Nenner bei einer großen Zahl von Ländern oftmals auf einem sehr niedrigen Niveau liegt. Sanktionen fehlen außerdem oft, oder sie bleiben wirkungslos. Oftmals betreffen die entsprechenden Maßnahmen auch nicht die eigentlich relevanten Akteure, so dass sie kaum wirksam sind.

Es zeigt sich, dass Verbesserungen bei den ökonomischen und institutionellen Rahmenbedingungen einen gewissen Beitrag leisten können, um das tatsächliche Entscheiden und Handeln nachhaltigen Werten anzunähern, dass die Erfolgsaussichten aber eher verhalten sind. Es macht daher Sinn, sich einer weiteren Gruppe möglicher Ursachen für das Auseinanderfallen von Werten und Handeln im Hinblick auf Nachhaltigkeit zu widmen: den in den individuellen Entscheidungssträgern liegenden Barrieren.

6. Weitere Barrieren für nachhaltiges Handeln

6.1 Ungenügendes Wissen

Einige der in den Entscheidenden selbst liegenden Barrieren wurden bereits oben genannt. Ungenügendes Wissen und Verunsicherung spielen eine wichtige Rolle. So wissen etwa viele Entscheidungsträger sehr wenig über die kurz- und vor allem langfristigen Folgen nicht-nachhaltiger Land- und Meeresnutzung bzw. des Ressourcenabbaus. Möglichkeiten zur Beschaffung von Information sind dabei durchaus vorhanden. Diese Möglichkeiten werden jedoch vielfach nicht genutzt – aus Gründen der später noch erläuterten Trägheit und auch weil die Dringlichkeit des Risikos eines nicht-nachhaltigen Umgangs mit den Ressourcen der Erde häufig nicht wahrgenommen wird (LOEWENSTEIN et al. 2001, WEBER 2006). So liegen etwa die Probleme der globalen Erwärmung für viele Menschen in geographisch und zeitlich gesehen großer Distanz. Auch die Nicht-Nachhaltigkeit des Abbaus seltener Erden in China ist für viele Entscheidungsträger nicht fassbar und nicht vorstellbar, u. a. aufgrund der großen geographischen Entfernung (LEISEROWITZ 2007, LORENZONI et al. 2007, LEISEROWITZ et al. 2006, LORENZONI und PIDGEON 2006).

Es kommt dazu, dass viele Informationen in einer Weise vorhanden sind bzw. abgegeben werden, die für viele Akteure nicht nutzbar ist. Will man für eine bessere Information in der Breite sorgen, gilt es zunächst, sich derjenigen Medien zu bedienen, die von den Entscheidungsträgern ohnehin gerne und oft genutzt werden. Heutzutage scheinen solche Medien besonders wirksam zu sein, die einen Netzwerk-Charakter aufweisen, wie beispielsweise Facebook, Twitter, whatsApp u. ä. Der Vorteil solcher Medien ist unter anderem, dass sie von vielen Akteuren ohnehin häufig frequentiert werden, so dass sie kaum Zusatzaufwand betreiben müssen, um Informationen über die nachhaltige Nutzung von Ressourcen zu bekommen.

Daneben ist es auch wichtig, für unterschiedliche Adressatenkreise unterschiedliche Darstellungsformen der Information zu verwenden. Werden die Adressaten in einer für

sie „passenden“ Weise angesprochen, erhöht das die Chancen auf eine tatsächliche Auseinandersetzung mit den Themen deutlich. So kann man etwa Texte oder Filme, Comics oder Games, Zeitungsartikel oder wissenschaftliche Publikationen, einfache und auf die konkrete Lebenssituation der Leser bezogene oder eher abstrakte Darstellungen, quantitative oder qualitative Darstellungen usw. wählen. Beispiele für die immer größer werdende Vielfalt unterschiedlicher Informations- und Kommunikationsformen sind Internetseiten, auf denen man den eigenen ökologischen Fußabdruck (WACKERNAGEL und BEYERS 2010) berechnen kann und sich so einen Eindruck davon verschaffen kann, das Wievielfache unseres Planeten wir benötigen würden, wenn jeder Mensch weltweit Ressourcen so nutzen würde, wie man selbst es tut. Weiter gibt es Apps, die einem den CO₂-Gehalt eines eben getätigten Einkaufs ermitteln oder auch die Darstellung eines wissenschaftlichen Berichts zur globalen Transformation in Richtung auf mehr Nachhaltigkeit in Form einer *Graphic Novel* (HAMANN et al., im Erscheinen). Je nachdem, welchen Adressatenkreis (Kinder oder Erwachsene, gut oder weniger gut Ausgebildete, jüngere oder ältere Erwachsene, Studierende oder Berufstätige, Männer oder Frauen usw.) man „im Visier“ hat, sollte die Darstellungsform unterschiedlich ausfallen.

In diesem Zusammenhang ist auch darauf hinzuweisen, dass für Schülerinnen und Schüler sowie für Studentinnen und Studenten die Nachhaltigkeit im Umgang mit den Ressourcen der Erde ein Thema im Rahmen ihrer Ausbildung sein sollte. Hierfür sind entsprechende Medien und Materialien, beispielsweise auch in elektronischer Form (z. B. videobasierte Lehrveranstaltungen wie die des WBGU als Beitrag zum Wissenschaftsjahr 2012 des BMBF „Zukunftsprojekt Erde“ <http://wit.va-bne.de/>) einzusetzen. Ziel müsste es dabei sein, die Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung im Nachhaltigkeitsbereich wie auch den Bestand an positivem Wissen der Akteure zu vergrößern.

Ungenügendes Wissen vieler Akteure manifestiert sich auch darin, dass sie ihre laufenden Energiekosten nicht kennen und nicht in der Lage sind, potenzielle Ersparnisse in diesem Bereich mental richtig einzuordnen (THALER 1985). Viele Entscheidungsträger wissen im Übrigen gar nicht genau, was sie tun könnten, um sich nachhaltiger, also z. B. energieeffizienter, zu verhalten (ATTARI et al. 2010, GARDNER and STERN 2008, LARRICK und SOLL 2008). Die meisten Akteure sind außerdem nicht fähig, Kosten-Nutzen-Analysen durchzuführen oder Optionswerte, d. h. den Wert künftiger Handlungsmöglichkeiten, zu berechnen, was erforderlich wäre, wenn sie rationale Entscheidungen treffen wollten. Viele Entscheidende sind weiterhin durch widersprüchliche Berichte zum Klimawandel verunsichert und können Wetter- und Klimaphänomene nicht unterscheiden. Schließlich ist auch zu erwähnen, dass Akteure vielfach darauf verzichten, sich aktiv zu informieren, weil sie befürchten, dass die entsprechende Information unangenehme oder negative Komponenten umfasst und Akteure solche Art von Information eher vermeiden wollen (CERULO 2006, NORGAARD 2006).⁸ Auch Handlungen, die mit negativen Konsequenzen verbunden sein könnten, unterbleiben daher oft, selbst wenn die potenziellen Nutzen insgesamt größer als die potenziellen Kosten wären.⁹

Die Adäquatheit und Nutzbarkeit von Informationen scheint insgesamt gesehen also eine wichtige Rolle zu spielen. Die Aufgabe, solche „angemessenen“ Informationen verfügbar zu machen, stellt sich Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ebenso wie Firmen

8 Vgl. dazu unten die Ausführungen zum Thema „loss aversion“.

9 BOSTROM et al. 2012, S. 220.

und der staatlichen Administration. Hierzu würde beispielsweise auch gehören, die Anzahl der Labels zur Kennzeichnung der Effekte bei Gewinnung und Nutzung von Ressourcen bzw. Produkten einzuschränken sowie die durch diese Labels transportierten Informationen auf ein übersichtliches und einfach handhabbares Maß zu begrenzen. Nur so kann eine effektive Nutzung der durch die Labels vermittelten Informationen erreicht werden.

Kann für eine verstärkte Nutzung von grundsätzlich vorhandenen Informationen gesorgt werden, würden dadurch Unsicherheiten reduziert, und es könnte außerdem Vertrauen in die Information geschaffen werden. Auf diese Weise – und vor allem, wenn das Ganze noch durch die oben erwähnten dezidierten und glaubwürdigen politischen Vorgaben unterstützt wird – könnte eine stärkere Langfristorientierung der Akteure erreicht werden, welche ihrerseits nachhaltige Entscheidungen und nachhaltiges Verhalten unter sonst unveränderten Bedingungen begünstigt.

6.2 Verzerrte Wahrnehmungen

Manche Probleme, die in der Folge der nicht-nachhaltigen Nutzung von Ressourcen auftreten, werden kaum wahrgenommen und sind daher auch nicht entscheidungsrelevant, weil sie in der Erfahrungswelt der Akteure nicht präsent sind (wie beim Klimawandel zum Beispiel) oder auch in den Medien kaum vorkommen (wie etwa die Folgen des *Shrimp Farming* oder der *Offshore*-Windenergie). Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom sogenannten „Availability Bias“, demzufolge man vor allem diejenigen Dinge wahrnimmt, die man bereits kennt bzw. mental verfügbar hat und alle anderen Dinge eher nicht wahrnimmt. Mental verfügbar ist ein Ereignis dann, wenn man leicht und schnell in der Lage ist, sich Beispiele für das Ereignis vorzustellen oder in Erinnerung zu rufen.¹⁰ Manche Phänomene scheinen (vorübergehend) besonders gut im Gedächtnis der Akteure zu bleiben, und zwar wenn entsprechende eigene Erfahrungen oder sehr lebhaft berichtete Erfahrungen anderer vorliegen. Auch dies wäre eine Ausprägung des „availability bias“ bzw. der „Verfügbarkeits-Heuristik“.¹¹ Beispiele im Zusammenhang mit natürlichen Ressourcen oder generell im Umweltbereich sind etwa die Flut in England im Jahr 2007 oder auch der Film *The Day After Tomorrow*. Beides sorgte dafür, dass Bedrohungen von Ressourcen oder der Umwelt während einer gewissen Zeit sehr stark wahrgenommen wurden. Es zeigt sich allerdings, dass der aufrüttelnde Effekt derartiger Ereignisse oder Schilderungen nach wenigen Monaten bereits deutlich abgenommen hat und in der Regel nach ca. einem Jahr gänzlich verschwunden ist.

Manches wird auch deswegen stark wahrgenommen, weil Entscheidungsträger Kausalitäten herstellen. Wird etwa ein heißer Sommer durch den Klimawandel erklärt, ist den Entscheidungsträgern die Wahrnehmung des Klimawandels sehr präsent. Man spricht hier vom „representativity bias“, um zum Ausdruck zu bringen, dass aus einem einzelnen Ereignis (heißer Sommer) bereits auf das dahinter liegende Phänomen (Klimawandel) geschlossen wird. Das einzelne Ereignis wird als „repräsentativ“ für eine Gruppe von Ereignissen angesehen.¹²

10 JUNGERMANN et al. 2005, S. 173 f.

11 JUNGERMANN et al. 2005, S. 173 f.

12 JUNGERMANN et al. 2005, S. 170 ff.

Weiter ist eine starke Wahrnehmung für solche Ereignisse zu beobachten, die nicht zu den von den Akteuren vertretenen Theorien passen. Tritt beispielsweise ein sehr kalter Winter ein, so scheint dies nicht zur Hypothese der globalen Erwärmung zu passen, was von den Akteuren dann oft als besonders auffällig wahrgenommen wird. Im Sinne der Repräsentativitätstheorie könnte ein sehr kalter Winter als Beleg für das Fehlen globaler Erwärmung interpretiert werden. Da diese Interpretation im Gegensatz zu dem steht, was heutzutage mehrheitlich vertreten wird, erhält das Phänomen besondere Aufmerksamkeit. Studien zeigen, dass eine Fokussierung auf den Klimawandel als Ursache für Veränderungen in der beobachtbaren natürlichen Umwelt der Menschen eine größere Bereitschaft von Akteuren nach sich zieht, tatsächlich ihr Verhalten in Richtung auf mehr Nachhaltigkeit zu verändern.¹³

6.3 Unsicherheit

Unsicherheit über die künftigen Rahmenbedingungen von Entscheidungen über den Umgang mit den Ressourcen der Erde führen häufig dazu, dass sich Akteure nicht für nachhaltiges Verhalten entscheiden, obwohl sie eigentlich durchaus durch nachhaltige Werte gekennzeichnet sind (METCALF und HASSETT 1999, HASSETT und METCALF 1993). Über die Bedeutung der politischen Rahmenbedingungen in diesem Zusammenhang wurde im letzten Abschnitt bereits gesprochen. Aber auch weitergehende Unsicherheiten sind relevant. Wenn beispielsweise unsicher ist, wie hoch die Preise für Erdöl oder Strom in den nächsten 10 oder 20 Jahren sein werden, oder wenn unklar ist, welche technologischen Innovationen in den Bereichen Mobilität oder Wohnen in den nächsten 10, 20 oder 30 Jahren verfügbar sein werden, kann dies dazu führen, dass Investitionen mit dem Ziel einer effizienteren Verwendung von Energie unterbleiben.

Akteure haben angesichts dieser Unsicherheiten auch erhebliche Unsicherheiten über mögliche Erträge aus heute durchgeführten Verhaltensänderungen. Die Kosten der Verhaltensänderungen erscheinen dann übermäßig hoch bzw. die Verhaltensänderungen erscheinen als zu riskant und unterbleiben daher. So wurde beispielsweise festgestellt, dass Hauseigentümer, die grundsätzlich zu einer Renovation ihres Hauses bereit wären, in deren Zug auch die Energieeffizienz des Hauses erhöht würde, eine solche Renovation nicht durchführen, wenn sie sehr unsicher über künftige Energiepreise sind (ALBERINI et al. 2013). Will man den Weg zu mehr Verhaltensänderungen zugunsten von Nachhaltigkeit ebnen, käme es also darauf an, besser über künftige Entwicklungen zu informieren, um auf diese Weise die Unsicherheit zu reduzieren. Nun kann über künftige Entwicklungen häufig bestenfalls mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsangaben informiert werden. Wahrscheinlichkeiten werden aber von vielen Entscheidenden kaum in ihrer Bedeutung verstanden. Zumindest im Hinblick auf die jüngeren Generationen leitet sich hieraus ein klarer Bildungsauftrag ab.

Ein weiterer Aspekt von ungenügendem Wissen und Verunsicherung liegt in der Unsicherheit über das Verhalten anderer begründet. Wenn Akteure nicht wissen, wie sich die Akteure in ihrem Umfeld verhalten werden, sind sie häufig nicht bereit, (vorübergehende) Nachteile in Kauf zu nehmen, da sie befürchten, sie seien die einzigen, die Nachteile zu tragen hätten, während alle anderen von ihrem Verhalten profitieren würden (*Prisoners'*-Dilemma-Problem; KERR 1983). Die Bereitschaft, sich auf eine solche Situation einzulas-

13 ALBERINI et al. 2013, S. 75 f.

sen, ist verständlicherweise gering, wäre aber oftmals notwendig, um Verhaltensänderungen hin in Richtung auf mehr Nachhaltigkeit zu bewirken.

In eine ähnliche Kategorie fällt auch das sogenannte NIMBY-Phänomen („Not In My Backyard“), wonach Akteure Nachhaltigkeit grundsätzlich gut finden und durch entsprechende Wertvorstellungen gekennzeichnet sind, jedoch nicht bereit sind, etwas für die Nachhaltigkeit zu tun (DEVINE-WRIGHT 2010, QUAH und TAN 1998). Nachhaltig sollten sich besser die anderen verhalten.

Schließlich wird vielfach auch argumentiert, man brauche sein Verhalten nicht zu verändern, da diese Verhaltensänderung im Hinblick auf das eigentlich angestrebte Ziel keinen Effekt hätte. Nur wenn sehr viele andere Akteure ihr Verhalten auch ändern würden, hätte das Ganze eine genügend große Wirkung (LARRICK und SOLL 2008). Da aber die anderen ihr Verhalten vermutlich nicht ändern würden, bräuchte man selbst es auch nicht zu tun. Es zeigt sich also, dass die Bereitschaft, im Zuge von Verhaltensanpassungen zugunsten von Nachhaltigkeit gewisse Kosten zu tragen, die Überzeugung erfordert, dass auch andere entsprechende Kosten tragen.

6.4 Trägheit und soziale Netzwerke

Eine weitere Barriere besteht, wie oben bereits erwähnt, in der Trägheit bzw. der Scheu von Entscheidungsträgern vor Veränderungen (EPSTEIN 1999). Viele Akteure scheuen den mit solchen Veränderungen verbundenen Aufwand, weshalb sie etwa ihre Stromanbieter oder Stromtarife wider besseren Wissens nicht wechseln, den Umstieg von Fahrten mit privaten PKWs auf Fahrten mit dem Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) unterlassen oder auf Renovationen bzw. Sanierungen ihrer Häuser oder Wohnungen zur Erhöhung der Energieeffizienz verzichten. Aus Trägheit unterbleibt vielfach das Umschalten von Geräten in den Standby-Modus bzw. das komplette Ausschalten von Elektrogeräten in Phasen der Nichtnutzung. Die Trägheit kann beispielsweise dadurch begründet sein, dass sich Entscheidende davor scheuen, Entscheidungen zu treffen, die sie hinterher bereuen könnten, etwa wenn sich zeigt, dass die künftigen Energiepreise anders ausfallen, als aus heutiger Sicht erwartet (ZEELENBERG et al. 2002). Außerdem ist ganz generell der sogenannte Status-quo-Bias zu beobachten, gemäß dem Akteure eine Tendenz haben, das Beibehalten der aktuellen Situation gegenüber einer Veränderung zu bevorzugen (ANDERSON 2003, KAHNEMAN et al. 1991).

Die Trägheit bzw. das Vermeiden des Aufwands von Verhaltensänderungen scheint immer dann besonders groß zu sein, wenn die Veränderung nicht durch eine „soziale Kompensation“, also beispielsweise durch besondere Anerkennung im Freundeskreis, begleitet wird. In diesem Zusammenhang kommt daher den sozialen Netzwerken eine wesentliche Rolle zu (ABRAHAMSE und STEG 2009). Hier können sich Akteure einerseits Anerkennung für ihre Nachhaltigkeitsbemühungen holen und sich andererseits davon überzeugen, dass sie nicht die einzigen sind, die etwas für die Nachhaltigkeit tun. Durch den Austausch konkreter Tipps können möglicherweise individuelle Nachhaltigkeitsanstrengungen sogar effizienter und wirkungsvoller werden. Unter bestimmten Voraussetzungen könnte die Anwesenheit von Experten bzw. Wissenschaftlern im Netz sowohl für die Anerkennung als auch für den Austausch förderlich sein. Unter Umständen kann allerdings die Anwesenheit von Experten das Vertrauenspotenzial des Austauschs im sozialen Netzwerk auch eher verkleinern.

In Verbindung mit der „sozialen Kompensation“ durch entsprechende soziale Netzwerke ist auch der Effekt von Vorbildern zu beachten. Sehen individuelle Entscheider, dass Sportlerinnen, Schauspieler, Wirtschaftsführer, Politikerinnen oder andere Personen, denen sie nacheifern, bestimmte nachhaltige Verhaltensweisen an den Tag legen, beispielsweise nur noch kleine Autos fahren oder auf den ÖPNV umsteigen, so wird dies häufig einen nachahmenden Effekt auslösen. Dies wird umso eher und umso stärker der Fall sein, je mehr Wissen über das Verhalten der Vorbilder und je mehr Unterstützung für das nachahmende Verhalten aus den sozialen Netzwerken resultiert (TSAKAS 2012). Es ist dabei möglich, dass Akteure ein bestimmtes nachhaltiges Verhalten an den Tag legen, ohne dass sie durch die entsprechenden nachhaltigen Werte gekennzeichnet sind. Sie verhalten sich vielmehr nachhaltig, z. B. in der Form, dass sie ein Hybrid-Auto anstelle eines benzinbetriebenen Autos kaufen, weil sie hoffen, damit sozialen Status und Anerkennung zu bekommen (GRISKEVICIUS et al. 2010, BIRD und SMITH 2005). Soziale Normen, die in bestimmten, für die Entscheidungsträger relevanten Gruppen herrschen, sind also ausschlaggebend dafür, wie effizient sie mit Energie umgehen oder – allgemeiner gesagt – wie nachhaltig sie sich verhalten (HANDGRAAF et al. 2013, SCHULTZ et al. 2007).

Eine ganz neue Form, in der soziale Netzwerke für die Veränderung von Verhaltensweisen hin zu nachhaltigem Verhalten beitragen können, ist die sogenannte *Gamification* (METZLER 2012). Sie wurde 2012 von DELOITTE zu einem der zehn wichtigsten Technologie-Trends weltweit erklärt. Die Idee der *Gamification* ist, dass Elemente aus Computerspielen auf die reale Welt übertragen werden und dass auf diese Weise Spaß an und Motivation für bestimmte (nachhaltige) Verhaltensweisen geschaffen werden kann. Typische Elemente der *Gamification* sind der sichtbare Status der einzelnen Gruppenmitglieder sowie entsprechende Ranglisten (beispielsweise im Hinblick darauf, wer im letzten Monat am meisten Energie gespart hat), verschiedene Aufträge, die man von den anderen Gruppenmitgliedern erhält, Wettbewerbe unter den Gruppenmitgliedern und auch Aufgaben, in denen in kleinen Gruppen effektiv zusammengearbeitet werden muss, sofortiges Feedback von anderen auf das eigene Handeln und schließlich Belohnungen, die auch untereinander getauscht werden können. Der Vorteil solcher Ansätze besteht darin, dass individuell unterschiedliche Antriebe aufgegriffen und spielerisch verstärkt werden können. Ein Problem könnte allerdings darin liegen, dass das große Ausmaß an Anerkennung und Unterstützung durch die Gruppe zu einem Ausbleiben der eigenen intrinsischen Motivation führt. Dieses *Crowding Out* könnte gegebenenfalls auch auf andere Bereiche übergreifen und dort ebenfalls für ein Ausbleiben der intrinsischen Motivation sorgen, so dass sich die Akteure im Endeffekt und in der Summe weniger nachhaltig verhalten als ohne die *Gamification*.

Eine andere Möglichkeit zum Überwinden der Entscheidungs- bzw. Veränderungsträgheit besteht im Einrichten sogenannter „Nudges“, d. h. sogenannter „kleiner Schubser“ (THALER und SUNSTEIN 2008). Hiermit ist gemeint, dass die nachhaltigen Alternativen als defaultmäßige Standardlösung vorgegeben werden. Man kann dann gegen diese Standardlösung protestieren und sich für eine andere, weniger nachhaltige Lösung explizit entscheiden. Gerade wegen der Trägheit der Entscheidungsträger zeigt sich aber, dass solche Proteste nur selten erfolgen und daher gute Chancen für ein breit ausgeprägtes nachhaltiges Verhalten bestehen (ALLCOTT und MULLKAINATHAN 2010, DINNER et al. 2009). Ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz eines solchen *Nudges* ist die defaultmäßige Umstellung des standardmäßig in der Stadt Zürich bezogenen Strommixes auf eine ökologischere Va-

riante. Diese Umstellung wurde für alle Haushalte vom städtischen Elektrizitätswerk veranlasst – man konnte aber dagegen protestieren und den weniger ökologischen und leicht billigeren Strommix beziehen. Faktisch haben das nur sehr wenige Haushalte in Anspruch genommen, so dass hier sehr rasch ein signifikanter Ruck in Richtung Nachhaltigkeit ausgelöst werden konnte (EWZ 2007). Ein ähnliches und auch ähnlich erfolgreiches Beispiel ist die defaultmäßige Ausstattung von Neubauten in den USA mit Stromsparlampen (DINNER et al. 2009).

Der Ansatz der *Nudges* wird gelegentlich im Hinblick darauf kritisiert, dass er paternalistisch sei und den Individuen vorgebe, was sie zu wollen haben. Empirische Studien aus verschiedenen Bereichen legen allerdings nahe, dass die *Nudges* den Individuen eher bei der Realisierung derjenigen Strategien helfen, die sie ohnehin bevorzugen. So unterscheidet sich etwa die Bereitschaft, eine Niere zu spenden, zwischen Deutschland und Österreich fundamental (*Nationaler Ethikrat* 2007). Es ist zu vermuten, dass die „echte“ Spendenbereitschaft in beiden Ländern ungefähr gleich ist. Die tatsächlich geäußerte Spendenbereitschaft ist aber in Österreich, einem Land mit defaultmäßiger Nierenspende, drastisch höher als in Deutschland mit defaultmäßigem Verzicht auf eine Spende. Außerdem ist anzumerken, dass ein Vorteil des *Nudges*-Ansatzes auch darin besteht, dass nicht nur der Staat, sondern beispielsweise auch Firmen (wie im Beispiel der Zürcher Stromkunden) die entsprechenden Anreize setzen können.

Nudges würden vor allem deshalb helfen, weil sie den Aufwand von Entscheidungsträgern reduzieren. Der Aufwand, den Entscheidungsträger häufig betreiben müssten, um sich genügend Grundlagen für eine Entscheidung zu schaffen, die sie zu einer Veränderung ihres Verhaltens bringen könnte, ist nämlich zum Teil groß (Informationen sind nur verstreut zu finden, zum Teil widersprüchlich und unvollständig, usw.) und wird von vielen Individuen gescheut. Vielfach entscheiden sich Akteure dann im Vorfeld dafür, auf den kognitiven Aufwand der Informationssammlung und -auswertung zu verzichten und infolgedessen ihr bisheriges Verhalten weiter beizubehalten (ALBERINI et al. 2013, FASOLO et al. 2009, IYENGAR et al. 2006). Außerdem spielt auch der oben erwähnte Status-quo-Bias eine Rolle. *Nudges* könnten hier helfen, weil sie diejenigen Entscheidungsträger, die eine gewisse Bereitschaft haben, ihr Verhalten nachhaltiger zu machen, in die Lage versetzen, diese Verhaltensänderung durchzuführen, ohne dafür einen größeren kognitiven Aufwand betreiben zu müssen.

6.5 Rebound-Effekte

Eine weitere Form von Trägheit kommt vielfach dadurch zum Ausdruck, dass sich Akteure im Hinblick auf die Nutzung mancher Ressourcen nachhaltiger verhalten, mit anderen Ressourcen aber eher weniger nachhaltig umgehen. Man spricht hier auch vom sogenannten Rebound-Effekt (BERKHOUT et al. 2000). Dieser Effekt ist im Energiebereich schon seit langem beobachtbar und bekannt. Gemäß britischer Statistiken verbesserte sich etwa mit der Einführung elektrischen Stroms für Straßenlaternen deren Effizienz um den Faktor 20, die Beleuchtungsintensität nahm aber um mehr als das 400-fache zu (HÄNGGI 2012). „Rebound“ meint also, dass der Verbrauch eines Guts aufgrund effizienterer Technologie zurückgehen müsste, faktisch aber nicht so stark sinkt, wie es aufgrund der neuen Technologie zu erwarten wäre. Rebound-Effekte treten dabei nicht nur im Zusammenhang

mit der Nachfrage nach Energie, sondern beispielsweise auch im Zusammenhang mit der Verwendung von Zeit auf. Können wir bestimmte Tätigkeiten dank neuer Technologien schneller erledigen als bisher (z. B. Wäschewaschen), führen wir sie oft häufiger durch, so dass der zeitliche Gesamtaufwand für diese Tätigkeiten weniger stark sinkt oder sogar steigt (HÄNGGI 2012). Empirische Studien für den Energiebereich zeigen allerdings, dass nicht mit einem 100%igen Rebound zu rechnen ist, sondern dass die technologisch möglichen Energieeinsparungen um bis zu 50% geschmälert werden können (GILLINGHAM et al. 2013).

Es scheint so zu sein, dass Akteure eine Art „Budget“ für ihre individuellen Nachhaltigkeitsanstrengungen haben und dass ihr Verhalten von diesem Budget gesteuert wird. Das Phänomen der mentalen Budgetierung ist aus der psychologischen Literatur bekannt (THALER 1999), und zwar vor allem für den Bereich monetärer Ausgaben von Individuen. Das Grundmotiv hinter dem (an Geldgrößen orientierten) mentalen Budgetdenken besteht darin, dass Individuen es auf diese Weise schaffen, ihre Ausgaben für bestimmte Bereiche (z. B. Kleidung oder Ernährung) zu begrenzen. Beim Ausgeben von Geld für bestimmte Zwecke scheinen dabei häufig kaum Substitutionen zulässig zu sein, d. h. wenn man in einem Bereich weniger Geld ausgibt, steht dies mental nicht zwangsläufig für andere Bereiche zur Verfügung. Innerhalb eines Bereichs sind solche Substitutionen allerdings durchaus zulässig. Es wäre also mit dem Budgetierungsmodell vereinbar, dass man öfter mal zum Essen ins Restaurant geht, dafür aber an anderen Tagen nur von Pasta lebt, so dass das für Ernährung vorgesehene Budget nicht überschritten wird.

Während das mentale Budgetieren im Zusammenhang mit Geld oder Einkommen deutlich macht, wie viel man insgesamt und auch für bestimmte Zwecke aufwenden will, um daraus Nutzen zu ziehen, geht es im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit darum, zu welchen Anstrengungen man sich moralisch verpflichtet fühlt, um langfristige Nutzenverluste zu vermeiden. Es geht also einerseits um Anstrengungen, die individuelle Kosten verursachen und daher auf einem möglichst tiefen Niveau gehalten werden sollen. Andererseits sollen aber künftige Verluste vermieden werden und ein gewisser moralischer Nutzen erreicht werden. Es scheint so, dass ein individuell unterschiedliches Mindestmaß an moralischem Nutzen aus Nachhaltigkeitsanstrengungen erreicht werden soll. Viele Entscheidungsträger verspüren offenbar eine moralische Verpflichtung, sorgsam mit den Ressourcen der Erde umzugehen (BIERHOFF 2002, THØGERSEN 1999, STERN et al. 1995, HINES et al. 1987, BLACK et al. 1985). Es geht dabei aber offenbar nicht darum, ein möglichst hohes Maß an moralischem Nutzen zu erlangen, sondern ein gewisses Anspruchsniveau zu erreichen und weitere Kosten für ein Überschreiten dieses Niveaus nicht in Kauf zu nehmen. In anderen Worten: ist ein solches Anspruchsniveau durch Verhaltensänderungen bei bestimmten Handlungen erreicht, muss bei weiteren Handlungen keine Rücksicht mehr auf die Einhaltung von Nachhaltigkeitsstandards genommen werden.

Leisten Entscheidende etwa Kompensationszahlungen für die Treibhausgasemissionen ihrer Flugreisen, scheinen manche ihr Budget an nachhaltigem Verhalten schon weitgehend erfüllt zu haben und gönnen sich daher ein paar zusätzliche Flugreisen, zusätzliche Elektrogeräte oder pflegen weitere CO₂-emittierende Konsumaktivitäten (UKERC 2007, GRUBB 1990). Ähnlich wird der Ersatz eines Autos durch ein Hybrid-Auto oftmals von der Anschaffung eines weiteren zusätzlichen Autos begleitet. Es ist also ein typischer Rebound-Effekt zu beobachten (KHAN und DHAR 2006, NOVEMSKY und DHAR 2005, DHAR und SIMONSON 1999).

Möglich wäre auch, dass der Rebound-Effekt auf der Basis des sogenannten „Single action bias“ (WEBER 1997) zustande kommt. Demzufolge kommt es häufig nur zu einer einzigen Verhaltensänderung, beispielsweise zum generellen Abschalten des Standby-Modus, ohne dass weitere energiesparende oder effizienzsteigernde Verhaltensänderungen stattfinden. Bereits mit einer Handlung ist oft das „gute Gewissen“ der Akteure erreicht, und weitere Verhaltensänderungen sind nicht mehr notwendig. Dieser Effekt steht in engem Zusammenhang mit dem Effekt des „finite pool of worry“ (WEBER 2006), der besagt, dass die Menge an Verhaltensänderungen, die durch Besorgnis, etwa über die Klimaerwärmung oder die begrenzte Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen, ausgelöst werden, nicht beliebig groß ist. Macht man sich in einem Bereich mehr Sorgen (etwa über das CO₂, das man beim Fliegen emittiert), macht man sich in einem anderen Bereich (etwa hinsichtlich der Energieeffizienz des eigenen *Air-Conditioning*-Geräts) weniger Sorgen und ändert sein Verhalten in diesem Bereich also nicht.

Durch den Austausch in sozialen Netzwerken kann der Rebound-Effekt allerdings reduziert werden, wenn nämlich zum Beispiel deutlich wird, dass sich die anderen Personen im sozialen Netzwerk um mehr Nachhaltigkeit bemühen und den Rest ihres Verhaltens unverändert lassen. Das Mindestmaß an Nachhaltigkeit, das Individuen erreichen wollen, kann also durch die jeweilige Norm im sozialen Netzwerk bestimmt und nach oben oder gegebenenfalls auch nach unten verschoben werden (BAERISWYL et al. 2011, KOTCHEN und MOORE 2008, SCHULTZ et al. 2007).

6.6 Zeit- und Risikopräferenz

Nachhaltige Werte und tatsächliches Handeln vieler Akteure fallen häufig auch deswegen auseinander, weil die individuellen Entscheidungsträger eine hohe Präferenz für ihr Wohlbefinden in der Gegenwart und der nahen Zukunft haben, jedoch weniger an dem interessiert sind, was in der fernerer Zukunft passiert. Man spricht dann auch davon, dass die Individuen eine hohe Diskontrate haben bzw. dass sie sehr ungeduldig seien. Eine hohe Diskontrate wird dabei umso eher vorzufinden sein, je unsicherer die Akteure über Geschehnisse und Rahmenbedingungen in der Zukunft sind (GREENE 2011). Unter solchen Voraussetzungen erscheint eine hohe Präferenz für die Gegenwart und das Fehlen von langfristig orientiertem Denken geradezu folgerichtig. Ein weiterer wichtiger Bestimmungsgrund für die Höhe der Diskontrate ist die Einkommens- und Vermögenssituation der entsprechenden Personen. Wohlhabendere Personen sind in der Regel geduldiger, d. h., sie haben eine kleinere Diskontierungsrate (ALBERINI et al. 2013, MOSELEY 2001, TRAIN 1985). Da viele Akteure, wie schon ausgeführt, wenig Wissen über die künftige Ressourcennutzung und deren Folgen haben und da sie in der Regel auch kaum über Strategien verfügen, sich entsprechendes Wissen anzueignen – hier kommt unter anderen auch die erwähnte Trägheit wieder zum Zuge –, und da viele Entscheidungsträger weltweit nicht als besonders wohlhabend zu kennzeichnen sind, sind hohe Diskontraten durchaus plausibel (KORTENKAMP und MOORE 2006).

Entscheidungsträger sind im Durchschnitt nicht nur durch eine hohe Diskontrate charakterisiert, sondern auch durch ein hohes Maß an Risikoaversion (EPPER et al. 2011). Sie scheuen vor Verlusten zurück, da ihnen diese typischerweise sehr viel mehr „disutility“ bringen als das, was gleich hohe Gewinne an Nutzen erbringen. Diese von KAHNEMAN und

TVERSKY in die Literatur eingeführte grundlegende Erkenntnis der *Prospect*-Theorie,¹⁴ oftmals auch ausgedrückt durch die Formulierung „losses loom larger than gains“, kann als Begründung für die Risikoaversion vieler Entscheidungsträger dienen (vgl. Abb. 3). Sie kann die geringe Bereitschaft der Entscheidungsträger erklären, neue Verhaltensweisen, insbesondere nachhaltige Verhaltensweisen auszuprobieren oder zu übernehmen.

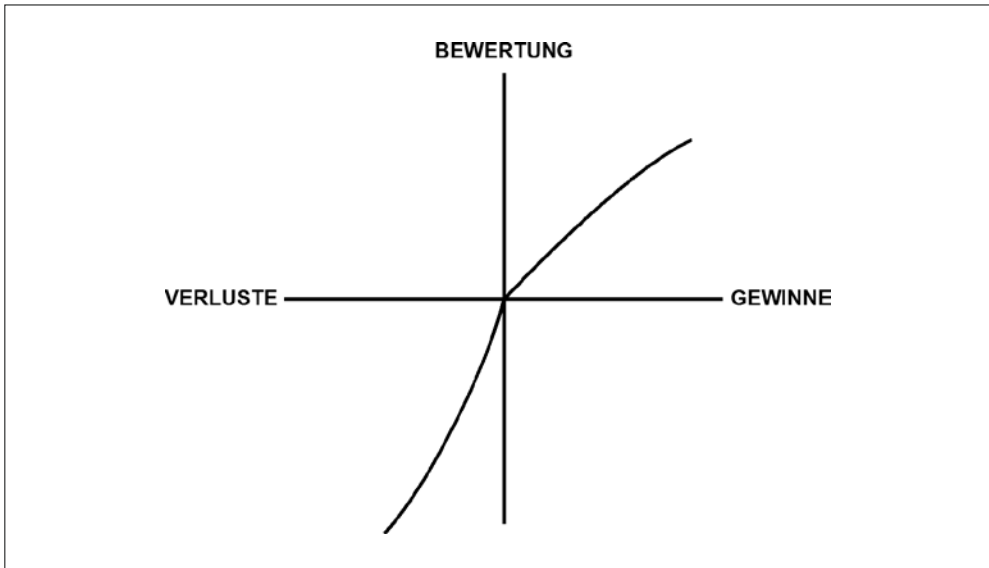


Abb. 3 Nutzen- und Dis-Nutzen von Gewinnen und Verlusten (eigene Darstellung, orientiert an KAHNEMAN und TVERSKY 1979, S. 279)

6.7 Liquiditätsbeschränkungen

Ein wesentlicher weiterer Grund für das Auseinanderfallen von Nachhaltigkeitswerten und faktischem Verhalten liegt in den Liquiditätsbeschränkungen der Akteure (GOLOVE und ETO 1996). Selbst wenn sie sich nachhaltig verhalten wollen und auch wissen, welche Verhaltensweisen nachhaltig wären, können sie sich diese Verhaltensweisen oft finanziell nicht leisten. Es fehlen vielfach die entsprechenden finanziellen Eigenmittel und auch die Bereitschaft bzw. Fähigkeit, Fremdkapital einzusetzen, um sich nachhaltig zu verhalten, also etwa das eigene Haus oder die eigene Wohnung zu sanieren, um dadurch eine höhere Energieeffizienz zu erreichen. Bei vielen Aktivitäten fallen im Zuge einer Umstellung von nicht-nachhaltigem zu nachhaltigem Verhalten erst einmal hohe Investitionskosten und mitunter auch vorübergehend höhere laufende Kosten an. Diese hohen *Upfront*-Kosten müssen finanziert werden, was häufig nicht gelingt. Treten derartige Liquiditätsprobleme auf, bedeutet dies im Übrigen meistens auch, dass die Gegenwartspräferenz der Akteure steigt, weshalb die Chancen für langfristig orientierte nachhaltige Entscheidungen sinken.

14 JUNGERMANN et al. 2005, S. 220 ff., KAHNEMAN und TVERSKY 1979.

Tatsächliche Liquiditätsbeschränkungen und ein wahrgenommen ungünstiges Verhältnis der Erträge und Kosten bzw. Risiken nachhaltigen Verhaltens greifen oftmals ineinander. In ökonomisch eher beschränkten Situationen werden häufig, nicht zuletzt wegen des oben erläuterten größeren Gewichts von Verlusten im Vergleich zu Gewinnen, die Risiken oder Kosten von nachhaltigen Verhaltensweisen eher nach oben übertrieben, während die möglichen Erträge, gerade auch wenn man eine eher kurzfristige Perspektive hat, tendenziell unterschätzt werden. Gelingt es, Informationen über die Folgen von Nachhaltigkeit bzw. Nicht-Nachhaltigkeit stärker zu verbreiten, besser nutzbar zu machen und generell ihre Glaubwürdigkeit zu erhöhen, kann selbst bei Fehlen größerer Liquiditätsreserven ein wichtiger Schritt in Richtung Nachhaltigkeit gemacht werden. Die Einbettung von Informationen und vom Umgang mit ihnen in den Kontext sozialer Netzwerke könnte dabei für wesentliche Fortschritte sorgen.

Darüber hinaus können die oben erwähnten neuen Geschäftsmodelle dafür sorgen, dass der Liquiditätsbedarf im Zusammenhang mit nachhaltigem Handeln geringer und somit diese Barriere weniger wichtig wird. So könnten beispielsweise selbst in Niedrigeinkommensländern Investitionen in dezentrale Stromnetze und ein Zugang zu Strom aus diesen Netzen finanzierbar werden, wenn man beispielsweise einen Betreiber hätte, der ein Kreditsystem anwendet, das dem bei *Prepaid*-Handys ähnelt. Derartige Systeme sind in einer Vielzahl von Entwicklungsländern bereits bekannt und würden vorsehen, dass Haushalte mit sehr tiefen Einkommen Gutscheine für den Bezug von Strom erhalten, die sie an zentralen Computern freischalten können und dann anschließend die entsprechende Strommenge beziehen können (SCHLÄFLI 2012). Derartige Systeme, die zunächst einmal für Entwicklungsländer erarbeitet wurden, lassen sich im Übrigen analog auch für Haushalte mit niedrigem Einkommen in Industrieländern oder generell in reicheren Ländern anwenden, um Liquiditätsprobleme im Zusammenhang mit steigenden Preisen für nachhaltiger produzierten Strom auffangen zu können.

7. Fazit

Es zeigt sich, dass die Werthaltungen der Menschen in vielen Ländern bereits relativ stark in Richtung eines nachhaltigen Umgangs mit den Ressourcen dieser Erde gehen. Falsche Preise, problematische Institutionen, Liquiditätsprobleme und auch eine größere Zahl sozialpsychologischer Effekte sorgen aber dafür, dass nachhaltige Technologien und Verhaltensweisen nicht implementiert werden, obwohl die technischen Voraussetzungen dafür eigentlich vorhanden wären. Insbesondere um die sozialpsychologisch begründeten Barrieren aufzuheben, sind soziale Innovationen erforderlich, die ein Überbrücken der Lücke zwischen nachhaltigen Werten und nicht-nachhaltigem Verhalten ermöglichen. Darüber hinaus ist eine entschlossene Politik zugunsten von Nachhaltigkeit erforderlich, und es braucht bessere Institutionen und adäquate ökonomische Anreize.

Sozialen Innovationen wurde bisher beim Versuch, für mehr Nachhaltigkeit im Umgang mit den Ressourcen der Erde zu sorgen, eher wenig Beachtung geschenkt. Soziale Innovationen nutzen vor allem die soziale Verankerung von Entscheidungsträgern, um schneller und wirksamer für nachhaltige Verhaltensweisen zu sorgen. Neue Geschäftsmodelle, *Nudges*, *Gamification* und ganz generell die Nutzung von *Social Networks* sind wichtig zur Überwindung der Trägheit, zur Förderung von Vertrauen und Kooperation und

zur Unterstützung des Langfristdenkens. Auf dieser Grundlage scheinen Veränderungen von Verhaltensweisen dahingehend möglich zu werden, dass die Ressourcen der Erde in nachhaltiger Weise gewonnen und genutzt werden. Unterschiedliche Gruppen von Akteuren werden dabei in unterschiedlicher Weise auf soziale Innovationen reagieren. Es gibt daher nicht das einzige und alleinige Rezept, wie man zu nachhaltigeren Verhaltensweisen kommen kann. Das Ganze hat vielmehr den Charakter eines Puzzles, dessen Zusammenfügen nicht ganz trivial ist. Etliche Instrumente zur Vermittlung von Wertewandel und Verhaltensänderungen zum nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen der Erde sind bereits vorhanden, müssten allerdings verstärkt genutzt werden. Weitere Forschung über soziale Innovationen könnte einen zusätzlichen Beitrag zur Nachhaltigkeit im Umgang mit den Ressourcen der Erde leisten.

Literatur

- ABRAHAMSE, W., and STEG, L.: How do socio-demographic and psychological factors relate to households' direct and indirect energy use and savings? *J. Economic Psychology* 30/5, 711–720 (2009)
- ADEBAHR, C., SABATHIL, M., and SCHRÖER, S.: Rohstoffpolitik – Rückkehr des Staates? Whitepaper Ressourcenstrategie. Berlin: Stiftung Neue Verantwortung e.V. 2011
- ALBERINI, A., BANFI, S., and RAMSEIER, C.: Energy efficiency investments in the home: Swiss homeowners and expectations about future energy prices. *Energy J.* 34, 49–86 (2013)
- ALLCOTT, H., and MULLAINATHAN, S.: Behavior and energy policy. *Science* 1204–1205 (2010)
- ANDERSON, C. J.: The psychology of doing nothing: Forms of decision avoidance result from reason and emotion. *Psychol. Bulletin* 129/1, 139–167 (2003)
- ATTARI, S. Z., DEKAY, M. L., DAVIDSON, C. I., and BRUIN, W. B. DE: Public perceptions of energy consumption and savings. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 107/37, 16054–16059 (2010)
- BAERISWYL, M., STAAKE, T., and LOOCK, C.-M.: The effects of user identity and sanctions in online communities on real-world behavior. ICIS 2011 Proceedings. Paper 12. Internet: <http://aisel.aisnet.org/icis2011/proceedings/onlinecommunity/12> (aufgerufen am 25.1.2013) (2011)
- BARR, S.: Factors influencing environmental attitudes and behaviours – A UK case study of household waste management. *Environment and Behaviour* 39/4, 435–473 (2007)
- BERKHOUT, P. H. G., MUSKENS, J. C., and VELTHUIJSEN, J. W.: Defining the rebound effect. *Energy Policy* 28/6, 425–432 (2000)
- Bertelsmann-Stiftung*: Bürger wollen kein Wachstum um jeden Preis. Kurzbericht. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung 2010
- BIERHOFF, H.: Prosocial Behaviour, London: Psychology Press 2002
- BIRD, R. B., and SMITH, E. A.: Signaling theory, strategic interaction, and symbolic capital. *Current Anthropology* 46/2, 221–248 (2005)
- BLACK, J. S., STERN, P. C., and ELWORTH, J. T.: Personal and contextual influences on household energy adaptations. *J. Appl. Psychol.* 70/1, 3 (1985)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)/BfN (Bundesamt für Naturschutz): Naturbewusstsein 2011 – Bevölkerungsumfrage zu Natur und biologischer Vielfalt. Berlin, Bonn: BMU/BfN 2012
- BOSTROM, A., O'CONNOR, R. E., BÖHM, G., HANSS, D., BODI, O., EKSTRÖM, F., HALDER, P., JESCHKE, S., MACK, B., QU, M., ROSENTRATER, L., SANDVE, A., and SÆLENSMINDE, I.: Causal thinking and support for climate change policies: International survey findings. *Global Environmental Change* 22, 210–222 (2012)
- CERULO, K.: Never Saw It Coming: Cultural Challenges to Envisioning the Worst. Chicago: University of Chicago Press, 2006
- CIOCIRLAN, C., and PETERSON, C.: Does workforce diversity matter in the fight against Climate Change? An analysis of fortune 500 companies. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management* 19/1, 47–62 (2012)
- DEVINE-WRIGHT, P. (Ed.): Renewable Energy and the Public – From NIMBY to Participation. London, Sterling: Earthscan 2010

- DHAR, R., and SIMONSON, I.: Making complementary choices in consumption episodes: Highlighting versus balancing. *J. Marketing Res.* 36/1, 29–44 (1999)
- DINNER, I., JOHNSON, E. J., GOLDSTEIN, D. G., and LIU, K.: Partitioning Default Effects. Why People Choose Not to Choose. Working Paper. Rochester, New York: Social Science Research Network 2009
- EPPEL, T., FEHR-DUDA, H., and BRUHIN, A.: Viewing the future through a warped lens: Why uncertainty generates hyperbolic discounting. *J. Risk and Uncertainty* 43/3, 169–203 (2011)
- EPSTEIN, L. G.: A definition of uncertainty aversion. *Rev. Economic Studies* 66/3, 579–608 (1999)
- Europäische Kommission: Public Opinion – Eurobarometer Surveys.*
Internet: http://ec.europa.eu/public_opinion/index_en.htm (aufgerufen am 25.1.2013) (2013)
- EWZ – Elektrizitätswerk der Stadt Zürich: Ökologisch! Oder konventionell? Die Wahl Ihres persönlichen Stromprodukts hat viel bewirkt. Broschüre zur Tarifumstellung. Zürich: EWZ 2007
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations): *Livestock's Long Shadow. Environmental Issues and Options.* Rom: FAO 2006
- FASOLO, B., CARMELI, F. A., and MISURACA, R.: The effect of choice complexity on perception of time spent choosing: When choice takes longer but feels shorter. *Psychology and Marketing* 26/3, 213–228 (2009)
- FRANZEN, A., und MEYER, R.: Klimawandel des Umweltbewusstseins? Eine Analyse des ISSP 2000. *Z. Soziologie* 33/2, 119–137 (2004)
- GARDNER, G. T., and STERN, P. C.: The short list – The most effective actions US households can take to curb climate change. *Environment* 50/5, 12–24 (2008)
- GILLINGHAM, K., KOTCHEN, M. J., RAPSON, D. S., and WAGNER, G.: The rebound effect is overplayed. *Nature* 493, 475–476 (2013)
- GOLOVE, W. H., and ETO, J. H.: *Market Barriers to Energy Efficiency: A Critical Reappraisal of the Rationale for Public Policies to Promote Energy Efficiency.* LBL-38059. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory 1996
- GREENE, D. L.: Uncertainty, loss aversion, and markets for energy efficiency. *Energy Economics* 33/4, 608–616 (2011)
- GRISKEVICIUS, V., TYBUR, J. M., and VAN DEN BERGH, B.: Going green to be seen: Status, reputation, and conspicuous conservation. *J. Personality and Social Psychology* 98/3, 392–404 (2010)
- GRUBB, M. J.: Energy efficiency and economic fallacies. *Energy Policy* 18, 783–785 (1990)
- GRUNERT, K. G., BRUNSO, K., and BISP, S.: Food-related life style: Development of a crossculturally valid instrument for market surveillance. In: KAHLE, L. R., and CHIAGOURIS, L. (Eds.): *Values, Lifestyles and Psychographics*; pp. 337–354. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum 1997
- HAGENBÜCHLE, W.: Guangzhou und das künftige Auto. *NZZ* vom 24. August 2012, S. 23 (2012)
- HAMANN, A., ZEA-SCHMIDT, C., und LEINFELDER, R. (Eds.): *Die große Transformation: Klima – Kriegen wir die Kurve?* Berlin: Verlagshaus Jacoby & Stuart (2013, im Erscheinen)
- HANDGRAAF, M. J. J., VAN LIDTH DE JEUDE, M. A., and APPELT, K. C.: Public praise vs. private pay: Effects of rewards on energy conservation in the workplace. *Ecological Economics* 86, 86–92 (2013)
- HÄNGGI, M.: Effizienter mehr verbrauchen. *NZZ* vom 29. August 2012, S. 58 (2012)
- HASSETT, K. A., and METCALF, G. E.: Energy conservation investment. *Energy Policy* 21/6, 710–716 (1993)
- HINES, J. M., HUNGERFORD, H. R., and TOMERA, A. N.: Analysis and synthesis of research on responsible environmental behaviour: A meta-analysis. *J. Environmental Education* 18/2, 1–8 (1987)
- HOUSER, T., MOHAN, S., and HEILMAYR, R.: *A Green Global Recovery? Assessing US Economic Stimulus and the Prospects for International Coordination.* Policy Brief No. PB09–3. Washington DC: Peterson Institute for International Economics and World Resources Institute 2009
- HUNTER, L. M., HATCH, A., and JOHNSON, A.: Cross-national gender variation in environmental behaviours. *Social Science Quarterly* 85/3, 677–694 (2004)
- INGLEHART, R.: The silent revolution in Europe: Intergenerational change in post-industrial societies. *Amer. Political Science Rev.* 65, 991–1017 (1971)
- INGLEHART, R.: *The Silent Revolution. Changing Values and Political Styles among Western Publics.* Princeton, NJ: Princeton University Press 1977
- INGLEHART, R.: *Modernisierung und Postmodernisierung. Kultureller, wirtschaftlicher und politischer Wandel in 43 Gesellschaften.* Frankfurt (Main), New York: Campus 1998
- INGLEHART, R.: Changing values among western publics from 1970 to 2006. *West European Politics* 31, 130–146 (2008)
- IYENGAR, S. S., WELLS, R. E., and SCHWARTZ, B.: Doing better but feeling worse looking for the “best” job undermines satisfaction. *Psychol. Science* 17/2, 143–150 (2006)

- JUNGERMANN, H., PFISTER, H.-R., und FISCHER, K.: Die Psychologie der Entscheidung. Eine Einführung. 2. Aufl. München: Spektrum Akademischer Verlag 2005
- KAHNEMAN, D., KNETSCH, J. L., and THALER, R. H.: Anomalies: The endowment effect, loss aversion, and the status quo bias. *J. Economic Perspectives* 5/1, 193–206 (1991)
- KAHNEMAN, D., and TVERSKY, A.: Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica* 47/2, 263–292 (1979)
- KERR, N. L.: Motivation losses in small groups: A social dilemma analysis. *J. Personality and Social Psychology* 45/4, 819–828 (1983)
- KHAN, U., and DHAR, R.: Licensing effect in consumer choice. *J. Marketing Res.* 43/2, 259–266 (2006)
- KLUCKHOHN, C.: Values and value-orientation in the theory of action: An exploration in definition and classification. In: PARSONS, T., and SHILS, E. (Eds.): *Toward a General Theory of Action*; pp. 388–433. Cambridge, MA: Harvard University Press 1951
- KNAPP, G.: Sortiert Euch! Süddeutsche Zeitung Nr. 202, vom 1./2. September 2012, S. V2/1 (2012)
- KORTENKAMP, K. V., and MOORE, C. F.: Time, uncertainty, and individual differences in decisions to cooperate in resource dilemmas. *Personality and Social Psychology Bulletin* 32/5, 603–615 (2006)
- KOTCHEN, M. J., and MOORE, M. R.: Conservation: From voluntary restraint to a voluntary price premium. *Environmental and Resource Economics* 40, 195–215 (2008)
- KROH, M.: Wertewandel: Immer mehr Ost- und Westdeutsche ticken postmaterialistisch. *Wochenbericht des DIW* 34, 480–486 (2008)
- LARRICK, R. P., and SOLL, J. B.: The MPG Illusion. *Science* 320/5883, 1593–1594 (2008)
- LEISEROWITZ, A.: American opinions on global warming. A Yale-Gallup-ClearVision Institute Poll. New Haven, CT: Yale School of Forestry and Environmental Studies 2007
- LEISEROWITZ, A., KATES, R., and PARRIS, T.: Sustainability values, attitudes, and behaviors: a review of multinational and global trends. *Annu. Rev. Environment and Resources* 31, 413–444 (2006)
- LEVINSON, A., and NIEMANN, S.: Energy use by apartment tenants when landlords pay for utilities. *Resource Economics* 26/1, 51–75 (2004)
- LOEWENSTEIN, G., WEBER, E., HSEE, C., and WELCH, E.: Risk as feelings. *Psychol. Bulletin* 127, 267–286 (2001)
- LORENZONI, I., NICHOLSON-COLE, S., and WHITMARSH, L.: Barriers perceived to engaging with climate change among the UK public and their policy implications. *Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions* 17/3–4, 445–459 (2007)
- LORENZONI, I., and PIDGEON, N. F.: Public views on climate change: European and USA perspectives. *Climatic Change* 77/1–2, 73–95 (2006)
- METCALF, G. E., and HASSETT, K. A.: Measuring the energy savings from home improvement investments: evidence from monthly billing data. *Rev. Economics and Statistics* 81/3, 516–528 (1999)
- METZLER, M.: Das Geschäft mit unseren Schwächen. *Digitale Technologie von Firmen wie Nike hilft, uns zu disziplinieren – und bringt Geld.* *NZZ am Sonntag* vom 26. August 2012, S. 35 (2012)
- MOSELEY, W. G.: African evidence on the relation of poverty, time preference and the environment. *Ecol. Economics* 38, 317–326 (2001)
- Nationaler Ethikrat: Die Zahl der Organspenden erhöhen – Zu einem drängenden Problem der Transplantationsmedizin in Deutschland.* Stellungnahme. Berlin: Nationaler Ethikrat 2007
- NORGAARD, K. M.: We don't really want to know: environmental justice and socially organized denial of global warming in Norway. *Organization and Environment* 19, 347–370 (2006)
- NOVEMSKY, N., and DHAR, R.: Goal fulfillment and goal targets in sequential choice. *J. Consumer Res.* 32/3, 396–404 (2005)
- PARRY, M. L., CANZIANI, O. F., PALUTIKOF, J. P., VAN DER LINDEN, P. J., and HANSON, C. E. (Eds.): *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.* Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, New York, NY/USA: Cambridge University Press 2007
- POORTINGA, W., STEG, L., VLEK, C., and WIERSMA, G.: Household preferences for energy-saving measures: A conjoint analysis. *J. Economic Psychology* 24/1, 49–64 (2003)
- QUAH, E., and TAN, K. C.: The siting problem of NIMBY facilities: cost-benefit analysis and auction mechanisms. *Environment and Planning C: Government and Policy.* Pion Ltd., London 16/3, 255–264 (1998)
- RÖSSEL, J.: Daten auf der Suche nach einer Theorie. *Ronald Ingleharts Analysen des weltweiten Wertewandels.* In: MÖBIUS, S., und QUADFLIEG, D. (Eds.): *Kultur. Theorien der Gegenwart.* S. 545–556. Wiesbaden: VS 2006
- ROKEACH, M.: *The Nature of Human Values.* New York: The Free Press 1973
- SCHLÄFLI, S.: Kraftwerk auf Anhänger. *Handelszeitung* 43, vom 25. Oktober 2012, S. 69 (2012)


- SCHULTZ, P. W., NOLAN, J. M., CIALDINI, R. B., GOLDSTEIN, N. J., and GRISKEVICIUS, V.: The constructive, deconstructive and reconstructive power of social norms. *Psychological Science* 18/5, 429–434 (2007)
- SCHULTZ, P. W., OSKAMP, S., and MAINIERI, T.: Who recycles and when – A review of personal and situational factors. *J. Environmental Psychology* 15/2, 105–121 (1995)
- SCHWARTZ, S. H.: Universals in the content and structure of values: Theory and empirical tests in 20 countries. *Advances in Experimental Social Psychology* 25, 1–65 (1992)
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M., and MILLER, H. L. (Eds.): *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, New York, NY/USA: Cambridge University Press 2007
- SONNTAG-O'BRIEN, V., and USHER, E.: *Mobilising Finance for Renewable Energies. Thematic Background Paper. Bonn: Secretariat of the International Conference for Renewable Energies 2004*
- STERN, P. C., DIETZ, T., and GUAGNANO, G. A.: The new ecological paradigm in social-psychological context. *Environment and Behaviour* 27/6, 723–743 (1995)
- THALER, R. H.: Mental accounting and consumer choice. *Marketing Science* 4, 199–214 (1985)
- THALER, R. H.: Mental accounting matters. *J. Behavioral Decision Making* 12, 183–206 (1999)
- THALER, R. H., and SUNSTEIN, C. R.: *Nudge: Improving Decisions about Health, Wealth, and Happiness*. New Haven, CT, USA: Yale University Press 2008
- THØGERSEN, J.: Spillover processes in the development of a sustainable consumption pattern. *J. Economic Psychology* 20/1, 53–81 (1999)
- TRAIN, K. E.: Discount rates in consumers' energy-related decisions: A review of the literature. *Energy* 10/12, 1243–1253 (1985)
- TSAKAS, N.: Naive learning in social networks: Imitating the most successful neighbor. MPRA Paper 37796, <http://mpra.ub.uni-muenchen.de/37796/> (2012)
- UKERC (UK Energy Research Centre): *The Rebound Effect Report. An Assessment of the Evidence for Economy-wide Energy Savings from Improved Energy Efficiency*. <http://www.ukerc.ac.uk/Downloads/PDF/07/0710ReboundEffect/0710ReboundEffectReport.pdf> (October 2007)
- WACKERNAGEL, M., und BEYERS, B.: *Der Ecological Footprint. Die Welt neu vermessen*. Hamburg: Europäische Verlagsanstalt 2010
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit. Hauptgutachten 2003*. Berlin, Heidelberg: Springer 2003
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer. Sondergutachten 2006*. Berlin: WBGU 2006
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel. Hauptgutachten 2007*. Berlin, Heidelberg: Springer 2007
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Hauptgutachten 2011*. Berlin: WBGU 2011
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen): *Finanzierung der globalen Energiewende. Politikpapier 7*. Berlin: WBGU 2012
- WEBER, E. U.: Perception and expectation of climate change: Precondition for economic and technological adaptation. In: BAZERMAN, M., MESSICK, D., TENBRUNSEL, A., and WADE-BENZONI, K. (Eds.): *Psychological and Ethical Perspectives to Environmental and Ethical Issues in Management*; pp. 314–341. San Francisco: Jossey-Bass 1997
- WEBER, E. U.: Experience-based and description-based perceptions of long-term risk: Why global warming does not scare us (yet). *Climatic Change* 77/1–2, 103–120 (2006)
- Welt-Online*: Öko-Sünden regen 83 % der Deutschen auf. 28. August 2012
<http://www.welt.de/108832675> (2012a)
- Welt-Online*: Deutsche wollen Windparks, aber keine Strommasten. 29. August 2012
<http://www.welt.de/108827207> (2012b)
- WIPPERMANN, C.: *Die soziokulturelle Karriere des Themas „Ökologie“: Eine kurze Historie vor dem Hintergrund der Sinus-Lebensweltforschung*. MUM – Markt & Medien 3. Frankfurt (Main): Öko-Test Verlag 2005
- WVS (World Values Survey): *Values Change the World: The World Values Survey. Broschüre zum World Values Survey* (2008)
- WVS (World Values Survey): *World Values Survey 2005 Official Data File V. 20090901*. Stockholm: World Values Survey Association 2009

Renate Schubert

WVS (World Values Survey): www.worldvaluessurvey.org / <http://www.wvsevsdb.com>

ZEELENBERG, M., VAN DEN BOS, K., VAN DIJK, E., and PIETERS, R.: The interaction effect in the psychology of regret.
J. Personality and Social Psychology 82/3, 314–327 (2002)

Prof. Dr. Renate SCHUBERT
Institute for Environmental Decisions IED
CLD C 12.1
Clausiusstrasse 37
8092 Zürich
Schweiz
Tel.: +41 44 6324717
Fax: +41 44 6321042
E-Mail: schubert@econ.gess.ethz.ch



ISSN: 0369-5034
ISBN: 978-3-8047-3210-0