



**Leopoldina**  
Nationale Akademie  
der Wissenschaften

*April 2017 | Stellungnahme*

## Evolutionenbiologische Bildung in Schule und Hochschule

Bedeutung und Perspektiven



## Impressum

**Herausgeber:**

Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.  
– Nationale Akademie der Wissenschaften –  
Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale)

**Berliner Büro:**

Reinhardtstraße 14, 10117 Berlin

**Redaktion:**

Dr. Christian Anton

**Titelbild:**

Bereits Charles Darwin und Alfred Russel Wallace rätselten über die adaptive Bedeutung des Fellmusters von Zebras. Das Streifenmuster könnte bei einem Angreifer ein Verwirrbild auslösen, so dass z.B. Löwen bei hoher Laufgeschwindigkeit die einzelne Beute nicht mehr sicher ausmachen können. Andere Theorien besagen, dass das Muster Parasiten wie die Tsetse-Fliege abhält.

**Titelgestaltung und Abbildungen:**

Sisters of Design – Anja Krämer & Claudia Dölling GbR, Halle (Saale)

**Satz:**

unicommunication.de, Berlin

**Bildnachweis:**

Ernst Mayr (S. 10 links unten): Archives of the Museum of Comparative Zoology Ernst Mayr Library, Harvard University

**Druck:**

druckhaus köthen GmbH & Co. KG, Köthen

**Lektorat:**

Katharina Schmalz, Regensburg

**Auflage:**

2 500

**ISBN: 978-3-8047-3648-1**

**Zitiervorschlag:**

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2017): Evolutionsbiologische Bildung in Schule und Universität. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale).

**Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie, detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <https://portal.dnb.de> abrufbar.

# **Evolutionsbiologische Bildung in Schule und Hochschule**

Bedeutung und Perspektiven



## Vorwort

„Nichts in der Biologie macht Sinn außer im Lichte der Evolution“. Diese Einsicht, die der Evolutionsbiologe Theodosius Dobzhansky 1973 in einem Essay amerikanischen Biologielehrerinnen und -lehrern vermittelte, hat bis heute nicht an Aktualität verloren – im Gegenteil. Die Bedeutung der Evolutionsbiologie hat in den vergangenen Jahren stetig zugenommen, nicht zuletzt durch neue technische Entwicklungen in der Molekularbiologie.

Evolution ist ein allgegenwärtiger und sehr dynamischer Prozess. Die Konzepte und Erkenntnisse der Evolutionstheorie haben viele Berührungspunkte mit unserem Alltag, etwa bei unserem Umgang mit Infektionen. Wenn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler empfehlen, seltener Antibiotika zu verschreiben, so beruht dies auf einer evolutionsbiologischen Beobachtung: Die häufige Anwendung von Antibiotika forciert das Auftreten von resistenten Bakterienstämmen. Evolutionsbiologen und Mediziner diskutieren daher gemeinsam neue Konzepte, um die Bildung von Resistenzen zu verzögern und um zu verstehen, warum manche Pathogene wie Zika- und Ebola-Viren plötzlich Varianten hervorbringen, die zu einer Gefahr für die menschliche Gesundheit werden. Auch zum Umgang mit Krebs entwickeln Evolutionsbiologen und Onkologen zurzeit neue Ansätze. Doch nicht nur die Medizin profitiert von wichtigen Impulsen der Evolutionsbiologie. Die Verbindungen zwischen Evolutionstheorie und den Wirtschaftswissenschaften in der Spieltheorie sind ein Musterbeispiel für Transdisziplinarität.

Zu einem unabdingbaren Teil der Allgemeinbildung macht die Evolutionsbiologie vor allem ihr naturgeschichtlicher Aspekt: Woher stammt der Mensch? Was macht seine Alleinstellung aus? Welchen Einfluss hat die Kultur auf die Evolution? Die Konzepte der Evolutionstheorie, so eine zentrale Empfehlung dieser Stellungnahme, sollten in den Curricula der Schulen daher früher und umfassender berücksichtigt werden.

Es ist ein großes Verdienst der VolkswagenStiftung, mit der Förderlinie „Evolutionbiologie“ eine entsprechende Profilbildung an einer Reihe von Universitäten ermöglicht und unterstützt zu haben. An diese Initiative möchte die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina anknüpfen und auf die große Bedeutung des Themas für die Bildung an Schulen und Hochschulen, aber auch für die Forschung in diesem Bereich hinweisen. Ich hoffe, dass von dieser Stellungnahme entsprechende Impulse ausgehen und wünsche Ihnen eine anregende Lektüre.



*Prof. Dr. Jörg Hacker*  
Präsident  
Nationale Akademie der  
Wissenschaften Leopoldina



# Inhalt

Zusammenfassung und Empfehlungen .....	6
<b>1. Evolution als Erkenntnisprinzip der modernen Biologie.....</b>	<b>8</b>
1.1 Von Darwin zur modernen Evolutionsbiologie.....	8
1.2 Der Mensch als Produkt der Evolution.....	11
1.3 Der Mensch als Evolutionsfaktor.....	13
1.4 Angewandte Evolutionsbiologie.....	15
1.4.1 Resistenzen in Landwirtschaft und Medizin .....	15
1.4.2 Evolutionäre Medizin.....	18
1.4.3 Molekulare Abstammungsforschung.....	20
1.4.4 Anwendung evolutionärer Prinzipien .....	21
1.4.5 Evolutionäre Spieltheorie .....	22
<b>2. Die Evolutionsbiologie an Schulen und Hochschulen.....</b>	<b>25</b>
2.1 Fachwissenschaftliche Ausbildung .....	27
2.2 Fachdidaktische Ausbildung.....	31
<b>3. Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>34</b>
3.1 Den gegenwärtigen Stand der evolutionsbiologischen Ausbildung umfassend erheben und positive Tendenzen fördern.....	34
3.2 Die Evolutionsbiologie curricular und fachdidaktisch als integrativen Rahmen des Biologieunterrichts etablieren.....	35
3.3 Die Evolutionsbiologie als Grundlage der Lebenswissenschaften und als transdisziplinäres Forschungsprogramm an den Hochschulen stärken .....	39
<b>Glossar.....</b>	<b>41</b>
<b>Methodik.....</b>	<b>43</b>
Anlass und Entstehung der Stellungnahme .....	43
Mitglieder der Arbeitsgruppe .....	44
Gutachter .....	45
Literatur.....	46
Abkürzungsverzeichnis.....	51

## Zusammenfassung und Empfehlungen

1. Die biologische Evolution ist das vereinigende, übergreifende Erklärungsprinzip der Lebenswissenschaften. Die Evolutionsbiologie liefert Erkenntnisse zum Selbstverständnis des Menschen, zu seinen Interaktionen mit der Umwelt, zu seiner Gesundheit, seinen sozialen Interaktionen, seinem ökonomischen Handeln und seiner kulturellen Entwicklung. Deshalb gehören die Kenntnis wesentlicher Aussagen der Evolutionsbiologie über die Entwicklung des Lebens auf der Erde sowie das tiefere Verständnis der Mechanismen und der Dynamik von Evolutionsprozessen zum unverzichtbaren Fundament der naturwissenschaftlichen Bildung an Schulen und Hochschulen.
2. Zwischen der Bedeutung der modernen Erkenntnisse der Evolutionsbiologie und ihrer Vermittlung an deutschen Schulen und Hochschulen herrscht trotz Verbesserungen in den letzten Jahren immer noch eine große Diskrepanz. Bedingt durch den Missbrauch vermeintlich evolutionsbiologischer Konzepte im Nationalsozialismus sank in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg der Stellenwert der Evolutionsbiologie an deutschen Hochschulen. Dadurch verlor die evolutionsbiologische Forschung zeitweilig den Anschluss an die internationale Entwicklung, und die Ausbildungsinhalte wurden nicht entsprechend erneuert. Die Forschung und Lehre in Evolutionsbiologie soll daher durch gezielte Berufungen und Schwerpunktbildungen an Hochschulen neu verankert werden.
3. Handlungsempfehlungen für die generelle Verbesserung der evolutionsbiologischen Ausbildung sollten einer Strategie folgen, welche die Situation an Schulen und Hochschulen koordiniert angeht. Eine solche Strategie orientiert sich an 3 Zielen: (1) den gegenwärtigen Stand der evolutionsbiologischen Ausbildung umfassend zu erheben und positive Tendenzen zu fördern, (2) die Evolutionsbiologie curricular und fachdidaktisch als integrativen Rahmen des Biologieunterrichts zu etablieren und (3) die Evolutionsbiologie als Grundlage der Lebenswissenschaften und als transdisziplinäres Forschungsprogramm an den Hochschulen zu stärken.
4. Ein wichtiges Instrument für die nachhaltige Umgestaltung des Biologieunterrichts in der Schule, welches die zentrale wissenschaftliche und anwendungsbezogene Bedeutung der Evolution ernst nimmt, ist ein Curriculum, das die Evolutionsbiologie anschaulich als das verknüpfende Band und übergreifendes Erklärungsprinzip der modernen Lebenswissenschaften nutzt und verbindlich vorgibt. Hierzu gehört auch, die Evolutionsbiologie unter wissenschaftstheoretischen Gesichtspunkten zu betrachten, um so auch das Wesen der Naturwissenschaften in den Blick zu nehmen. Zu diesem Zweck müssen anschauliche evolutionsbiologische Beispiele und korrespondierende Vorschläge für Experimente und forschendes Lernen im Schulunterricht miteinander verknüpft werden. Vorbereitet und begleitet werden soll die Einführung eines solchen Curriculums durch die Erarbeitung von Unterrichts-

materialien, die theoriebasierte und empirisch geprüfte fachdidaktische Modelle für die Vermittlung modernen evolutionsbiologischen Wissens umsetzen, rasch auf wissenschaftliche Entwicklungen reagieren und ausgewählte Zielgruppen ansprechen. Ebenso sollte eine schnellere Umsetzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse in Lehrbücher – insbesondere auch unter Nutzung elektronischer Medien – angestrebt werden.

# 1. Evolution als Erkenntnisprinzip der modernen Biologie

Evolution ist das übergreifende, vereinigende Erkenntnisprinzip der Biologie. Die Evolutionsbiologie beschreibt die Entwicklung des Lebens auf der Erde und zeigt, wie das Prinzip der natürlichen Selektion im Zusammenspiel mit Zufallsprozessen die biologische Vielfalt geformt hat und diese weiterhin dynamisch verändert. Die Evolutionsbiologie erforscht die fundamentalen Prozesse, die zu ökologischen Anpassungen und neuen Arten führen, sowie die Regeln, nach denen Organismen, inklusive des Menschen, interagieren und Sozialsysteme bilden. Grundsätzliche Regeln der Evolution sind zudem auch für das ökonomische und soziale Handeln des Menschen von genereller Bedeutung. Im Folgenden werden diese Punkte ausgehend von der historischen Entwicklung im Einzelnen beleuchtet.

## 1.1 Von Darwin zur modernen Evolutionsbiologie

Es gibt nur wenige Theorien, die eine wissenschaftliche Revolution ausgelöst und das Weltbild der modernen Zivilisation tiefgreifend verändert haben.<sup>1</sup> Zu ihnen gehört die von Charles Darwin und Alfred Russel Wallace<sup>2</sup> begründete Evolutions-

theorie.<sup>3</sup> Mit dem Prozess der natürlichen Selektion haben sie einen Schlüsselmechanismus vorgeschlagen, der eine rein naturwissenschaftliche Erklärung für die Angepasstheit der Organismen an ihre Umwelt und für die Vielfalt der Arten liefert. Gleichzeitig stellt dieser Mechanismus die Voraussetzung für das Verständnis der historischen Entwicklung der Organismen auf der Erde dar. Dazu gehört, dass auch der Mensch ein natürlicher Teil des Stammbaums des Lebens auf der Erde ist und gleichermaßen durch die Mechanismen der Evolution geformt wurde bzw. immer noch wird.

### Die Grundlagen der Evolutionsbiologie

Die grundlegende Einsicht der Evolutionsbiologie ist, dass aus der Kombination zufälliger genetischer Variation und natürlicher Selektion Anpassungen an neue Umweltbedingungen entstehen können (Tab. 1 – Selektion). Neben der natürlichen Selektion ist auch die Neutrale Evolution ein wesentlicher Mechanismus evolutionärer Veränderungen (Tab. 1 – Drift). Die meisten molekularen Veränderungen im Erbgut (DNA) sind eher durch neutrale als durch selektive Mechanismen zu erklären. Selektion wirkt immer über die Eigenschaften bzw. das Erscheinungsbild eines Organismus (Phänotyp) und dieser ist das Produkt eines entwicklungsbiologischen Prozesses. Bei der Ausprägung des Phänotyps können auch Umwelteinflüsse eine Rolle spielen (Tab. 1 – Variation).

1 Der Evolutionsbiologe Ernst Mayr beschreibt die Konsequenzen von Darwins Theorie in seinem Aufsatz *Darwins Einfluss auf das moderne Weltbild* (2000). Link: <http://www.spektrum.de/magazin/darwins-einfluss-auf-das-moderne-weltbild/826771> (Stand: 10.01.2017).

2 Die Evolutionstheorie wird in der Öffentlichkeit fast ausschließlich mit Charles Darwin in Verbindung gebracht. Dies ist auch gerechtfertigt, da Darwin sich damit am längsten auseinandergesetzt und die besten Beispiele zusammengetragen hat. Tatsächlich hat jedoch auch Alfred Russel Wallace parallel zu Darwin ein sehr ähnliches Konzept entwickelt, das er Darwin in einem Brief mitteilte. Beide Theorien wurden 1858 gemeinsam auf einer Sitzung der Linnean Society in London erstmals öffentlich vorgestellt.

3 In dieser Stellungnahme werden die Begriffe „Evolutionstheorie“ und „Evolutionsbiologie“ synonym gebraucht. Damit soll deutlich gemacht werden, dass die von Darwin und Wallace vorgebrachten theoretischen Überlegungen durch die nachfolgende biologische Forschung nicht nur umfassend bestätigt, sondern darüber hinaus durch wesentliche Erkenntnisse weiterentwickelt worden sind.

Tabelle 1: Grundlegende Prinzipien der Evolutionsbiologie.

Prinzip	Erläuterung
Verwandtschaft	Zusammengehörigkeit der Lebewesen, die auf die gemeinsame Stammesgeschichte zurückzuführen ist. Evolutionäre Veränderungen erfolgen nur durch Modifikation existierender Linien.
Variation	Vielfalt der Ausbildung eines Merkmals innerhalb einer Art. Zu unterscheiden sind (1) die genetisch bedingte Variation, die durch zufällige Mutationen und genetische Rekombination entsteht, sowie (2) die Modifikation, bei der die Variation durch Umwelteinflüsse verursacht wird (phänotypische Plastizität – nicht erblich bedingt oder, im Falle epigenetischer Variation, nur bedingt vererbbar).
Fitness	Genetische Variation führt zu unterschiedlichen Genotypen, die die reproduktive Fitness bestimmen. Ob ein Genotyp mit seinen Allelen im Genpool der Folgegeneration vertreten ist, wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Dazu gehören z.B. die Anpasstheit des Individuums an seine Umwelt, die Fähigkeit, Geschlechtspartner zu finden, oder die relative Anzahl an Nachkommen.
Selektion	Individuen, die besser an die jeweils herrschenden Umweltbedingungen angepasst sind (Anpassung), erreichen mit höherer Wahrscheinlichkeit die Geschlechtsreife und werden so hinsichtlich der Fortpflanzung begünstigt (natürliche Selektion). Im Falle der Veränderung von Umweltbedingungen kommt es zu einer gerichteten Veränderung der Häufigkeit von Allelen im Genpool einer Population. Umweltfaktoren, die den Fortpflanzungserfolg beeinflussen, werden auch als Selektionsfaktoren bezeichnet.
Drift	Zufällige Veränderung der Häufigkeit von Allelen im Genpool einer Population. Drift tritt immer und in jeder Generation auf, ist aber stärker ausgeprägt in kleineren Populationen und über viele Generationen. Sie ist die Grundlage der Neutralen Evolution.

Evolutionäre Anpassungen und Veränderungen finden zwar kontinuierlich statt, haben aber keine bestimmte oder vorgegebene Richtung. Sie entwickeln sich **nicht** grundsätzlich vom Einfachen hin zum Komplexen bzw. von einem simpleren Aufbau eines Organismus hin zu einer komplexeren Organisationsform.<sup>4</sup> Der von Darwin genutzte Begriff „survival of the fittest“ bedeutet „Überleben des am besten Angepassten“, wird jedoch oft fälschlich als „Überleben des Stärkeren“ übersetzt. Obwohl das grundlegende Prinzip des Selektionsmechanismus sehr einfach erscheint (Variation → Selektion → Adaption), ergeben sich daraus viele, z.T. sehr komplexe Konsequenzen. Insbesondere die Frage nach der optimalen Lösung von Konflikten (z.B. um ökologische Ressourcen oder zwischen den Geschlechtern

oder zwischen Wirten und Parasiten) ist zu einem Kernthema moderner Evolutionsbiologie geworden. Dabei überschneidet sich die Evolutionsbiologie mit den Wirtschaftswissenschaften, welche die Optimierung und Konfliktlösung in ökonomischen Prozessen untersuchen.

#### Meilensteine der Evolutionsbiologie

Die Evolutionsbiologie ist nicht bei Darwin und Wallace stehen geblieben, sondern in wesentlichen Schritten erweitert worden (Abb. 1). Dazu gehört das Zusammenführen genetischer und evolutionsbiologischer Konzepte („Moderne Synthese“) und die darauf basierende Populationsgenetik, die Entwicklung der „Neutralen Evolutionstheorie“<sup>5</sup> sowie die Erforschung sozialer Interaktionen und Mechanismen der Kooperation. Mit diesen Weiterentwicklungen war auch eine Mathematisierung der Evolutions-

4 Stephen Jay Gould beschreibt in seinem Buch *Illusion Fortschritt* (2004) sehr anschaulich, warum es innerhalb der natürlichen Selektion keinen immanenten Mechanismus für einen Fortschritt gibt.

5 Kimura (1983).

## Meilensteine der Evolutionsbiologie



### Natürliche Selektion als Evolutionsmechanismus

Der von Charles Darwin (Foto) und Alfred Russel Wallace vorgeschlagene Mechanismus der natürlichen Selektion liefert die naturwissenschaftliche Erklärung für die Anpassung der Organismen an die Umwelt und die sukzessive Entstehung des Lebens.

### Moderne Synthese

Im Rahmen der Modernen Synthese werden Erkenntnisse zur natürlichen Selektion mit denen der Mendel'schen Genetik, der Populationsgenetik, Taxonomie, Morphologie und Paläontologie verbunden. Der in die USA emigrierte deutsche Biologe Ernst Mayr (Foto) war an der Modernen Synthese maßgeblich beteiligt.



### Verhaltens- und Soziobiologie

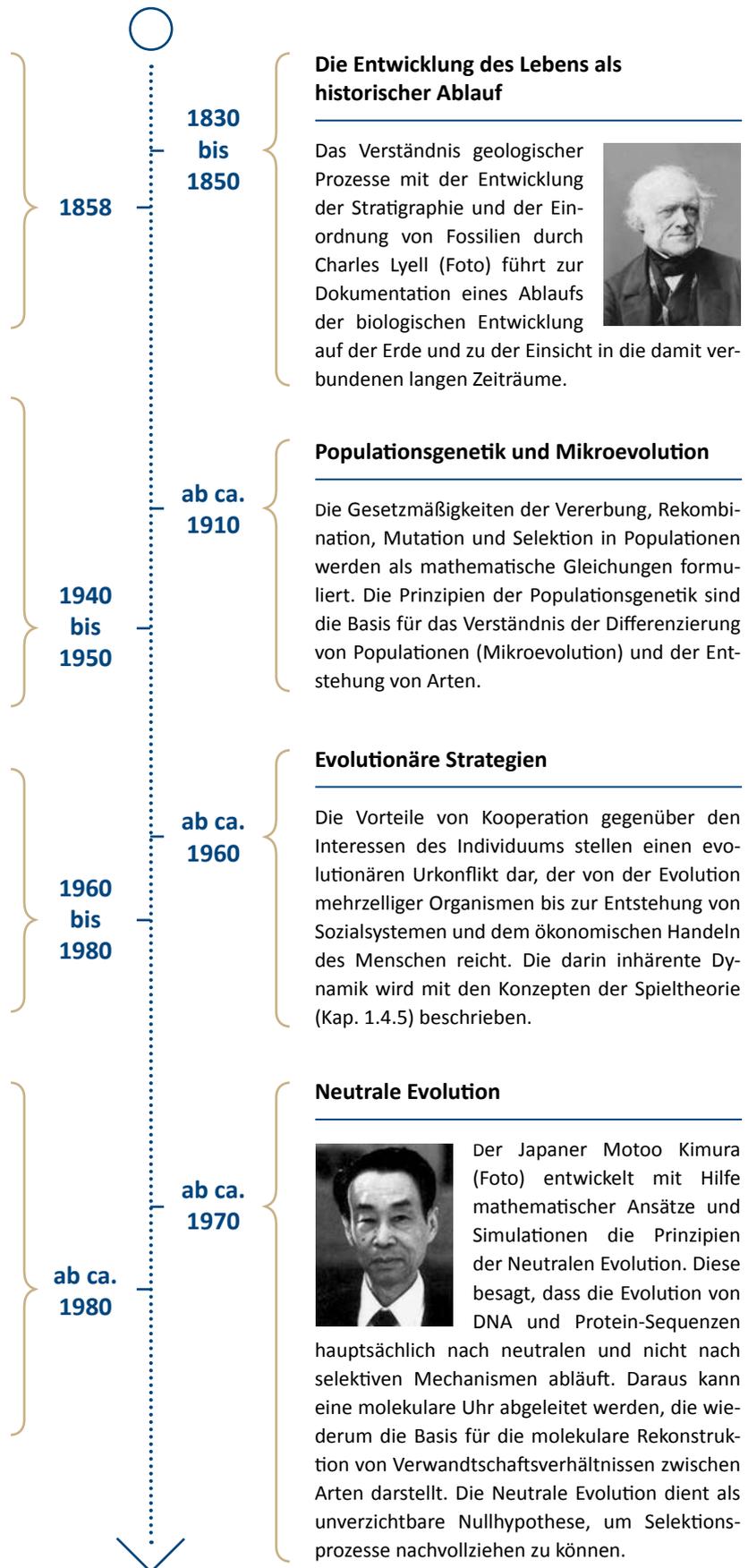
Die Verhaltensbiologie untersucht Interaktionen zwischen Individuen sowie die Entstehung von Sozialsystemen, in denen die Interessen des Individuums den Interessen der Gemeinschaft gegenüberstehen. Dazu gehört auch die Einsicht unterschiedlicher Interessen zwischen den Geschlechtern.

### Gen-Umwelt-Interaktion

Form und Funktion eines Organismus werden nicht nur durch genetische Faktoren, sondern auch durch Umweltfaktoren beeinflusst (Plastizität). Dies kann statistisch beschrieben werden und bildet die Basis für das Verständnis der evolutionären Anpassung. Damit verbundene molekulare Mechanismen werden durch die Epigenetik beschrieben. Erworbene epigenetische Veränderungen können z.T. an Folgegenerationen übertragen werden und damit Anpassungen beeinflussen.

### Abbildung 1: Meilensteine der Evolutionsbiologie.

Die Grafik zeigt die Entwicklung der wichtigsten Phasen und Konzepte der Evolutionsbiologie.



biologie verbunden, welche die bis dahin weitgehend auf Beobachtungen basierende Wissenschaft abstrahierte und neue konzeptuelle theoretische Grundlagen ausarbeitete. Diese Entwicklung ist in etwa vergleichbar mit der Entwicklung der Quantentheorie in der Physik, d.h. der Entstehung einer theoretischen Komponente als eigene Disziplin der Evolutionsbiologie. Diese theoretische Disziplin entwickelte sich international vor allem ab der Mitte des letzten Jahrhunderts. In dieser wichtigen Phase der Entwicklung der theoretischen Evolutionsbiologie fand in Deutschland aber nach dem Missbrauch der Evolutionsbiologie durch die Nationalsozialisten (insbesondere in der Rassenideologie) eine andere Schwerpunktsetzung in der Biologie statt, sodass die Evolutionsbiologie in der universitären Lehre und Forschung nur eine untergeordnete Rolle spielte. Die Folgen für die schulische Ausbildung wirken bis heute nach. Neue Erkenntnisse finden nur zögerlich Eingang in Curricula und Unterrichtsmedien und damit auch in den Schulunterricht. An den Hochschulen wird diese Fehlentwicklung seit ca. 15 Jahren zunehmend korrigiert, jedoch noch nicht flächendeckend in allen Fakultäten.

## 1.2 Der Mensch als Produkt der Evolution

Darwins Buch *On the origin of species* hat nach seinem Erscheinen im Jahr 1859 schnell den Weg in die öffentliche Diskussion gefunden. Der Grund hierfür war, dass sich aus seiner Theorie auch wesentliche Einsichten über die Evolution des Menschen ableiten ließen.<sup>6</sup> Grundsätzlich war klar, dass auch der Mensch Teil des evolutionären Kontinuums und damit Art-Entstehungsprozessen unterworfen ist, auch wenn Darwin diese Frage erst in seinem späteren Werk *The Descent*

*of Man, and Selection in Relation to Sex* (1871) explizit behandelte. Damit wurde eine unabhängig hiervon bereits existierende Diskussion zur Einteilung der Menschheit in verschiedenen hoch entwickelte Rassen belebt, die in der Folgezeit auch immer wieder politisch missbraucht wurde.<sup>7</sup>

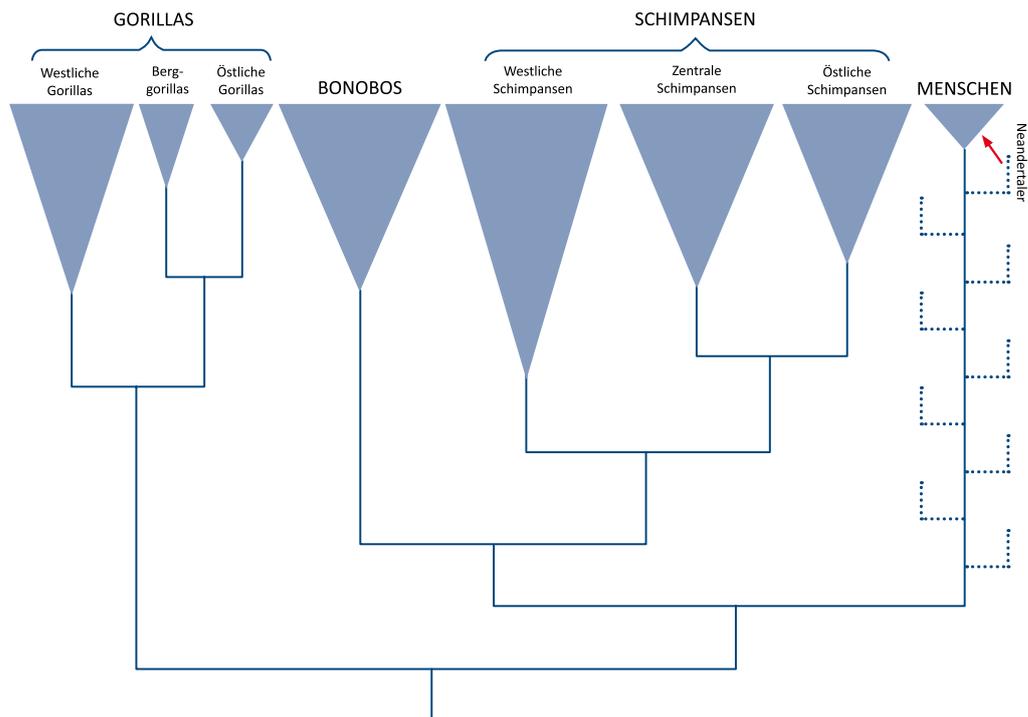
### Biologische Evolution des Menschen

Inzwischen liefern uns die moderne Evolutionsbiologie und die Paläontologie ein viel klareres Bild von der genetischen Variation des Menschen und seiner Abstammung (Abb. 2). Im Gegensatz zu den nächsten Verwandten des Menschen, den Schimpansen und Gorillas, stellt die molekulare Linie zum Menschen nur einen einzelnen langen Zweig dar, mit einer Aufspaltung erst in jüngster Zeit. Gleichzeitig gibt es jedoch viele Fossilienfunde, die belegen, dass Seitenlinien des modernen Menschen existiert haben, die aber alle ausgestorben sind, zuletzt die Linie des Neandertalers. Bei Gorillas und Schimpansen existieren diese Seitenlinien noch immer, z.T. mit sehr alter Aufspaltung (dargestellt durch die Tiefe der Dreiecke in Abb. 2). Tatsächlich zeigen Gorillas und Schimpansen damit ein für die meisten Arten typisches Bild. Dagegen ist das Bild für den Menschen eher ungewöhnlich. Folglich kann es für viele Arten sinnvoll sein, Unterarten oder Rassen zu definieren, im Gegensatz zum Menschen als extrem junge Spezies ist hingegen eine solche Unterteilung nicht angebracht.

Die direkten Vorfahren des heute lebenden Menschen (*Homo sapiens*) sind erst vor nicht viel mehr als ca. 10 000 Generationen aus einer vergleichsweise kleinen Ursprungspopulation hervorgegangen. Aus diesem Grund haben alle heutigen Menschen noch fast 90 Prozent

<sup>6</sup> Zu Darwins Unbehagen war dies jedoch weniger eine wissenschaftliche Diskussion als vielmehr eine populistische Auseinandersetzung.

<sup>7</sup> Charles Darwin war ein erklärter Gegner der Sklaverei. Die Vorstellung, dass alle Menschen gleichen Ursprungs seien und einen gemeinsamen Ahnen hätten, motivierte ihn u.a. zur Formulierung seiner Evolutionstheorie; siehe Desmond & Moore (2009).



**Abbildung 2:** Vergleich der genetischen Diversität des Menschen mit der seiner nächsten Verwandten, den Gorillas und Schimpansen. Die Tiefe und Breite der Dreiecke ist ein relatives Maß für die molekulare Vielfalt und das evolutionäre Alter der heute existierenden Linien. Die Abbildung ist nicht maßstäblich gezeichnet. Die Abspaltung des Menschen von den Schimpansen fand vor mindestens 7–8 Millionen Jahren statt, möglicherweise sogar bereits vor 13 Millionen Jahren.<sup>8</sup> Die Entwicklung des modernen Menschen begann hingegen erst vor ca. 200 000 Jahren. Alle heute lebenden Menschen stammen daher von einer sehr jungen Linie ab und sind miteinander vergleichsweise nah verwandt. Ältere und mehr diverse Linien (durch gestrichelte Zweige gekennzeichnet) sind ausgestorben und nur durch Fossilien belegt – wie z.B. der Australopithecus oder der Neandertaler. Allerdings ist es vor dem Aussterben des Neandertalers noch zu einem Gen-Austausch mit den menschlichen Populationen gekommen, die aus Afrika ausgewandert sind (roter Pfeil). Die Abbildung beruht auf Gagneux et al. (1999).

aller genetischen Varianten gemeinsam, und z.B. Menschen, die aus Europa oder Afrika stammen, unterscheiden sich in höchstens 10 Prozent der Varianten.<sup>9</sup> Das bedeutet, dass ein Europäer in vielen genetischen Varianten einem Afrikaner ähnlicher sein kann als seinem europäischen Nachbarn. Anders ausgedrückt: Alle Menschen sind sich genetisch sehr ähnlich, ihre Genvarianten sind problemlos austauschbar. Eine wie immer geartete Rasseinteilung ist daher beim Menschen evolutionsbiologisch nicht begründbar. Insbesondere gibt es keinerlei Hinweise auf eine vermeintliche Wertigkeit von Rassen. Eine solche wertende Gewichtung wäre im Übrigen auch bei allen anderen natürlichen Lebewesen nicht sinnvoll, sie

wäre bestenfalls auf künstliche Zuchtlinien anwendbar, z.B. bei der Beschreibung zu erwartender landwirtschaftlicher Erträge. Auch der oft verwendete Begriff der „reinen Blutlinie“ macht nur Sinn, wenn er auf künstliche Zuchtlinien angewendet wird, nicht aber auf natürliche Lebewesen und insbesondere nicht auf den Menschen.

Diese neuen Erkenntnisse zur genetischen Ähnlichkeit aller Menschen sind in der Öffentlichkeit noch zu wenig verbreitet. So können z.B. Buchautoren immer noch offen oder versteckt den Rassegedanken nutzen.<sup>10</sup> Ein besseres Verständnis der modernen Evolutionsbiologie in der breiten Öffentlichkeit könnte

<sup>8</sup> Langergraber et al. (2012), Venn et al. (2014).

<sup>9</sup> Li et al. (2008).

<sup>10</sup> Dazu gehören die Bücher von Thilo Sarrazin (2010) *Deutschland schafft sich ab* oder Nicholas Wade (2014) *A troublesome inheritance*.

helfen, solche Behauptungen schnell als falsch einzuordnen.<sup>11</sup>

### Historisch-kulturelle Geschichte des Menschen

Zunehmend bessere Einblicke erhalten wir auch in die historisch-kulturelle Geschichte des Menschen. Die Anwendung von Methoden aus der Molekularbiologie in der Archäologie hat in den vergangenen Jahren zu unerwarteten Einsichten in die Anthropologie und die Kulturgeschichte des Menschen geführt. Im Zentrum der Forschung steht dabei die Analyse alter DNA, d.h. die Anwendung technischer Möglichkeiten, um aus bis zu 400 000 Jahre alten Knochen Erbmateriale zu isolieren.<sup>12</sup> Mit Hilfe des Erbguts aus Knochen oder auch Zähnen ist es z.B. möglich, Aussagen über die Fähigkeit früherer Menschen zu treffen, Milchprodukte oder Stärke zu verdauen, und damit ihre Lebensweise besser zu verstehen.<sup>13</sup> Populationsgenetische Analysen alter DNA können Aufschluss darüber geben, wie Europa und die anderen Kontinente aus Afrika heraus besiedelt wurden und ob z.B. Vertreter sesshafter Kulturen Jäger und Sammler verdrängt haben.<sup>14</sup> In den Gebissen finden sich auch die Spuren von Krankheitserregern für Pest oder Tuberkulose. Auf Basis genetischer Analysen könnte die Geschichte dieser Krankheitserreger rekonstruiert werden.<sup>15</sup> Das Verständnis der Evolution von Viren und Bakterien und von deren Interaktion mit dem Immunsystem des Menschen ist für die heutige Gesundheitsversorgung von großer Bedeutung, insbesondere zur Eindämmung neu auftretender Erreger.

Neben der biologischen Evolution des Menschen ist dessen kulturelle und soziale

Entwicklung bereits seit dem 19. Jahrhundert Gegenstand der Forschung. Diese hat facettenreiche und z.T. kontroverse Denkrichtungen hervorgebracht, oft aber ohne ausreichende Einsicht in die biologische Evolution. Generell gilt für den Menschen, dass die Entstehung und die Selektion kultureller Fortschritte innerhalb einer Generation ablaufen können und damit viel schneller sind als die biologische Evolution. Insofern hat sich der Mensch teilweise von seiner biologischen Evolution entkoppelt, er wird aber gleichzeitig selbst zu einem wesentlichen neuen Faktor der Evolution für alle anderen Organismen.

### 1.3 Der Mensch als Evolutionsfaktor

Der Mensch ist nicht nur ein Produkt der Evolution, sondern hat im Rahmen seiner Ausbreitung über die gesamte Erde selbst Einfluss auf die Entwicklung der Biosphäre genommen. Heutzutage ist in beinahe allen Lebensräumen der Einfluss des Menschen auf die Ökosysteme deutlich feststellbar.<sup>16</sup> Die Zerstörung von Lebensräumen, die Verbreitung von invasiven Arten, ein erhöhter Nährstoffeintrag in Böden und Gewässer, erhöhte Kohlendioxid-Konzentrationen in der Atmosphäre sowie die damit verbundene Versauerung der Meere und der Anstieg der Durchschnittstemperatur verändern die Lebensbedingungen und stimulieren so Evolutionsprozesse bei vielen Tier- und Pflanzenarten sowie Mikroorganismen.<sup>17</sup>

### Klimawandel, Globalisierung und Evolution

Klimawandel und globalisierter Handel befördern den weltweiten Austausch von Tieren, Pflanzen, Pilzen und Mikroorganismen und die Einschleppung bzw. Einwanderung neuer Arten in Gebiete, wo diese ursprünglich nicht vorkamen. Entsprechende, neu eingeführte Arten sind oftmals eine starke

11 Unabhängig von evolutionsbiologischen Erkenntnissen ist festzuhalten, dass sich die Menschenwürde und die Menschenrechte nicht von genetischen Überlegungen ableiten, sondern allgemeingültig sind.

12 Krause & Pääbo (2016).

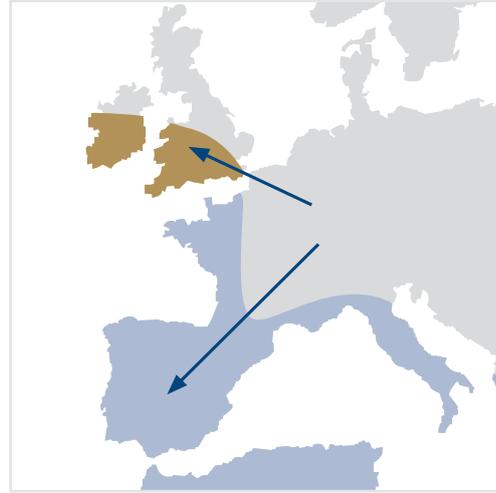
13 Curry (2013).

14 Haak et al. (2015).

15 Culotti (2015).

16 Der Nobelpreisträger Paul J. Crutzen prägte hierfür den Terminus „Anthropozän“ als neues geologisches Zeitalter; siehe Crutzen (2002).

17 Settele et al. (2014).



**Abbildung 3:** Mitteleuropäische Mönchsgrasmücken (links) überwintern gewöhnlich auf der Iberischen Halbinsel und in Nordafrika. Seit einigen Jahrzehnten fliegen Teile der Populationen jedoch im Herbst in das milde Klima von England und Irland (gelbe Flächen). Diese Teilung der Zugrouten könnte dazu führen, dass sich die Art aufspaltet – ein Beispiel für schnelle Evolution (siehe Rolshausen et al. (2009)). Blaue Flächen zeigen traditionelle Überwinterungsgebiete der Mönchsgrasmücke aus anderen Teilen Europas. Foto: Gernot Segelbacher.

Konkurrenz für einheimische Arten. Sie bringen fremde Krankheitserreger mit und können somit einen starken Selektionsdruck auf andere Arten ausüben.<sup>18</sup> Manche der neuen Arten wie etwa das Indische Springkraut oder der Riesenhärenklau sind dabei ökologisch so anpassungsfähig und evolutionär erfolgreich, dass sie innerhalb weniger Jahre ganze Lebensräume dominieren und die ursprüngliche Lebensgemeinschaft zurückdrängen.<sup>19</sup> Eine umfassende Kenntnis der evolutionsbiologischen Grundlagen solcher biologischer Invasionen hilft bei deren Vorbeugung und Bekämpfung und ist bedeutsam für den Naturschutz wie auch die Landwirtschaft.<sup>20</sup>

Sich verändernde Durchschnittstemperaturen in Mitteleuropa haben unmittelbare Folgen für Tier- und Pflanzenarten. So bewirkt der Klimawandel beispielsweise, dass eine häufige Vogelart, die Mönchsgrasmücke (Abb. 3), ihr Zugverhalten ändert. Ihre Populationen verließen früher die Brutgebiete in Süddeutschland und zogen

im Herbst geschlossen zur Überwinterung nach Spanien und Nordafrika. Seit einiger Zeit wird beobachtet, dass einige Tiere ihre eigenen Wege gehen – im doppelten Sinne des Wortes. Teile der süddeutschen Populationen ziehen nun im Herbst nach England und überwintern dort. Da diese Vögel einen kürzeren Weg haben, kommen sie im Frühjahr etwa zwei Wochen früher aus ihrem Winterquartier zurück. Im Brutgebiet angekommen, paaren sie sich mit anderen Überwinterern aus England, da potentielle Fortpflanzungspartner aus den traditionellen Winterquartieren noch gar nicht zurückgekehrt sind. Sollte sich dieser Trend verstetigen, könnte an der Mönchsgrasmücke beobachtet werden, wie durch den unterschiedlichen zeitlichen Ablauf des Vogelzuges aufgrund verschiedener Überwinterungsziele neue Arten entstehen.<sup>21</sup>

#### Mücken als Krankheitsüberträger

Durch den Klimawandel wird Mitteleuropa auch Lebensraum für Tierarten, die möglicherweise erst am Anfang einer Anpassung stehen. Unter besonderer Beobachtung stehen hierbei mehrere exotische Stechmücken-Arten, da sie verschiedene

<sup>18</sup> Moran & Alexander (2014).

<sup>19</sup> Vilà et al. (2010).

<sup>20</sup> In Deutschland verursachen 20 der wichtigsten gebietsfremden Tier- und Pflanzenarten jährlich Kosten von etwa 156 Millionen Euro; siehe Umweltbundesamt (2003).

<sup>21</sup> Bearhop et al. (2005).

Krankheiten übertragen können.<sup>22</sup> Die Asiatische Tigermücke (*Aedes albopictus*), die in den vergangenen Jahren vereinzelt in Deutschland aufgetreten ist, ist in ihrem ursprünglichen Verbreitungsgebiet ein Überträger (Vektor) für Tropenkrankheiten wie Dengue-, Chikungunya- und Gelbfieber. Damit sich das Virus in der Mücke fortpflanzen kann, muss es nach Untersuchungen im eigentlichen Verbreitungsgebiet dauerhaft über 20 Grad Celsius warm sein. Auch wenn es bereits Hinweise darauf gibt, dass an mehreren Orten in Südwestdeutschland Asiatische Tigermücken überwintert haben, wird zurzeit nicht erwartet, dass sich der Erreger in Deutschland etablieren kann. Trotzdem sollten die Evolutionsbiologie sowie die Ökologie der Tigermücke und anderer Vektoren aufmerksam verfolgt werden.<sup>23</sup>

#### Der Mensch als Selektionsfaktor: Evolution durch Fischfang

Vieles spricht dafür, dass der Mensch heute der größte Motor für evolutionäre Veränderungen ist und damit selbst als Selektionsfaktor betrachtet werden kann.<sup>24</sup> Neben einer indirekten Wirkung auf Organismen und Ökosysteme wie im Fall des Klimawandels nimmt der Mensch auch direkt Einfluss auf die Evolution von Tier- und Pflanzenarten. In der Fischerei beispielsweise werden bevorzugt große Fische gefangen, die kleinen gelangen durch die definierte Maschenweite der Netze zurück ins Meer. Mit dieser Festlegung auf eine bestimmte Körpergröße greift der Mensch in die Fortpflanzungsbiologie und damit in die Evolution z.B. des Dorsches und des Roten Lachses (Abb. 4) ein:<sup>25</sup> Individuen, die früher fortpflanzungsreif sind und letztlich kleiner bleiben, passieren die Fangnetze, bringen mehr Individuen für die nächste Generation hervor und nehmen damit innerhalb der Population

einen größeren Anteil ein. Durch diese Fangpraxis hat sich z.B. in der Region um Neufundland die durchschnittliche Größe der Dorsche in den vergangenen Jahren sukzessive verkleinert. Geschlechtsreife Tiere sind heute 25 Prozent kleiner als in den 1930er Jahren.<sup>26</sup>



**Abbildung 4:** Der Fang von Rotem Lachs, hier in der Bucht von Bristol (Alaska, USA), ist durch die Maschenweite der Netze auf eine bestimmte Fisch-Größe festgelegt. Damit beeinflusst der Mensch die Fortpflanzungsbiologie. Dies kann evolutionäre Veränderungen in Bezug auf die Größe und den Zeitpunkt der Geschlechtsreife zur Folge haben. Foto: Andrew P. Hendry.

## 1.4 Angewandte Evolutionsbiologie

Klimawandel, Krankheiten, Nahrungsmittelsicherheit und biologische Invasionen sind zentrale gesellschaftliche Herausforderungen, von denen jede auch eine evolutionsbiologische Dimension hat. Diese durch den Menschen verursachten globalen Probleme könnten zumindest partiell durch Konzepte der Evolutionsbiologie kompensiert werden. In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Anwendungsfelder evolutionsbiologischer Konzepte dargelegt.

### 1.4.1 Resistenzen in Landwirtschaft und Medizin

Die Bildung von Resistenzen ist ein Lehrbuchbeispiel für evolutionäre Anpassung. Ein Wirt und sein Parasit stehen unter dem permanenten Selektionswettbewerb, einen Vorteil gegenüber dem jeweiligen Gegenspieler zu erzielen. Führt eine Mutation

<sup>22</sup> Schaffner et al. (2013).

<sup>23</sup> Kampen (2016).

<sup>24</sup> Palumbi (2001), Thomas (2015).

<sup>25</sup> Jørgensen et al. (2007).

<sup>26</sup> Heino et al. (2002), Jørgensen et al. (2007).

beispielsweise beim Wirt zu einer Immunität gegenüber dem Parasiten, stirbt dieser aus, es sei denn, einzelne Parasiten-Individuen entwickeln einen neuen Weg, um die molekularen Mechanismen der Immunität zu umgehen. In der Landwirtschaft und in der medizinischen Versorgung findet sich dieses Prinzip der dynamischen evolutionären Anpassung (auch als „evolutionäres Wettrüsten“ bekannt) wieder. Pflanzenschutzmittel werden so lange eingesetzt, bis einzelne Schädlinge Resistenzen bilden, die sich anschließend oft konkurrenzlos und daher meist rasant innerhalb der Population ausbreiten. Schließlich verliert das Pestizid seine Wirkung, weshalb in der Folge ein neues Pflanzenschutzmittel mit einem neuen Wirkmechanismus entwickelt werden muss.

Die Verbreitung von Krankheitserregern und landwirtschaftlichen Schädlingen sowie deren Resistenzbildung sind für den Menschen ein zunehmendes Problem (Tab. 2). Man geht davon aus, dass sich bei Insektenarten etwa nach 10 Jahren durch natürliche evolutionäre Anpassungen Varianten bilden, die gegen Pflanzenschutzmittel resistent sind.<sup>27</sup> Bei Unkräutern dauert die Bildung von Resistenzen mit 10–25 Jahren etwas länger.

Am schnellsten und am folgenschwersten für den Menschen ist jedoch die Resistenzbildung bei Bakterien. Die extremen Vermehrungsraten, die Mutationen mit sich bringen, und die Fähigkeit, DNA anderer Organismen leicht in ihr eigenes Genom aufzunehmen (horizontaler Gentransfer), machen Bakterien sehr anpassungsfähig. Eine unsachgemäße Anwendung von Antibiotika in der Human- und Veterinärmedizin forciert die Entwicklung resistenter Stämme: Antibiotika selektieren gegen nicht-resistente Keime. Dadurch erst werden resistente

Keim-Varianten konkurrenzfähig, nutzen die frei werdenden Ressourcen und breiten sich aus. Hinzu kommen sogenannte multiresistente Stämme, bei denen keines der gängigen Antibiotika eine Wirkung zeigt. Die Antibiotika-Resistenzen stellen die Gesundheitsversorgung vor große Probleme. Schätzungen der Europäischen Gesundheitsbehörde European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) zufolge sterben in Europa jedes Jahr rund 25 000 Patientinnen und Patienten an den Folgen einer Infektion mit multiresistenten Bakterien.<sup>28</sup> In Deutschland wird die Zahl der Todesfälle durch Antibiotika-Resistenzen pro Jahr aktuell auf 6 000 bis 15 000 geschätzt.<sup>29</sup> Antibiotika-Resistenzen führen darüber hinaus zu längeren Krankenhausaufenthalten und letztlich auch zu höheren Behandlungskosten.<sup>30</sup> Die häufig geforderte Entwicklung und Erforschung neuer Antibiotika ist sehr aufwändig und teuer. Die Entwicklung dauert in der Regel rund 10 Jahre, die Kosten belaufen sich nach einer Schätzung auf bis zu 1 Milliarde US-Dollar.<sup>31</sup>

Um die Resistenzbildung zu verzögern, werden bei der Anwendung von Antibiotika und Pflanzenschutzmitteln verschiedene Strategien erprobt.<sup>32</sup> Grundsätzlich empfehlen viele Institutionen den sparsameren Umgang mit Antibiotika.<sup>33</sup> Im Zentrum der aktuellen Forschung steht die

<sup>28</sup> ECDC (2009).

<sup>29</sup> Die hohe Spannweite der Schätzungen innerhalb Deutschlands (Nationales Referenzzentrum an der Charité: 6 000; Bundesgesundheitsministerium: 15 000) als auch der Vergleich der relativen Schätzungen von Todesfällen aufgrund von multiresistenten Bakterien zwischen Europa (rund 750 Millionen Einwohner) und Deutschland (rund 80 Millionen Einwohner) zeigt, dass es hier auch methodische Unsicherheiten gibt. Bei diesen Zahlen muss auch berücksichtigt werden, dass ein Teil der Menschen wohl auch ohne antibiotikaresistente Keime gestorben wäre.

<sup>30</sup> Akademie der Wissenschaften in Hamburg & Leopoldina (2013).

<sup>31</sup> Larson (2007).

<sup>32</sup> Für eine Übersicht der Strategien siehe Kouyos et al. (2014).

<sup>33</sup> Akademie der Wissenschaften in Hamburg & Leopoldina (2013); DART (2015), Link: [https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/Publikationen/Gesundheit/Sonstiges/Bericht\\_DART\\_Deutsche\\_Antibiotika-Resistenzstrategie.pdf](https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/Publikationen/Gesundheit/Sonstiges/Bericht_DART_Deutsche_Antibiotika-Resistenzstrategie.pdf) (Stand: 25.01.2017).

<sup>27</sup> Die Arthropod Resistance Database <http://www.pesticide-resistance.org> (Stand: 10.01.2017) sammelt alle bekannten Fälle von Insektizid-Resistenzen; National Research Council (2000), Palumbi (2001), REX-Consortium (2013).

**Tabelle 2:** Jahreszahlen der Zulassung und der ersten beobachteten Resistenz von Antibiotika und Pflanzenschutzmitteln; siehe Palumbi (2001), CDC (2016). Das Auftreten von Resistenzen bedeutet jedoch nicht, dass ein Antibiotikum völlig wirkungslos ist.

	Jahr der Zulassung	Jahr der beobachteten Resistenz
<b>Antibiotikum</b>		
Sulfonamide	1930er	1940er
Penicillin	1943	1946
Streptomycin	1943	1959
Chloramphenicol	1947	1959
Tetracycline	1948	1953
Erythromycin	1952	1988
Vancomycin	1956	1988
Methicillin	1960	1961
Ampicillin	1961	1973
Cephalosporine	1960er	Ende 1960er
Linezolid	2000	2001
Daptomycin	2001	2005
Ceftaroline	2010	2010
<b>Herbizid</b>		
2,4-D	1945	1954
Dalapon	1953	1962
Atrazine	1958	1968
Picloram	1963	1988
Trifluralin	1963	1988
Triallate	1964	1987
Diclofop	1980	1987

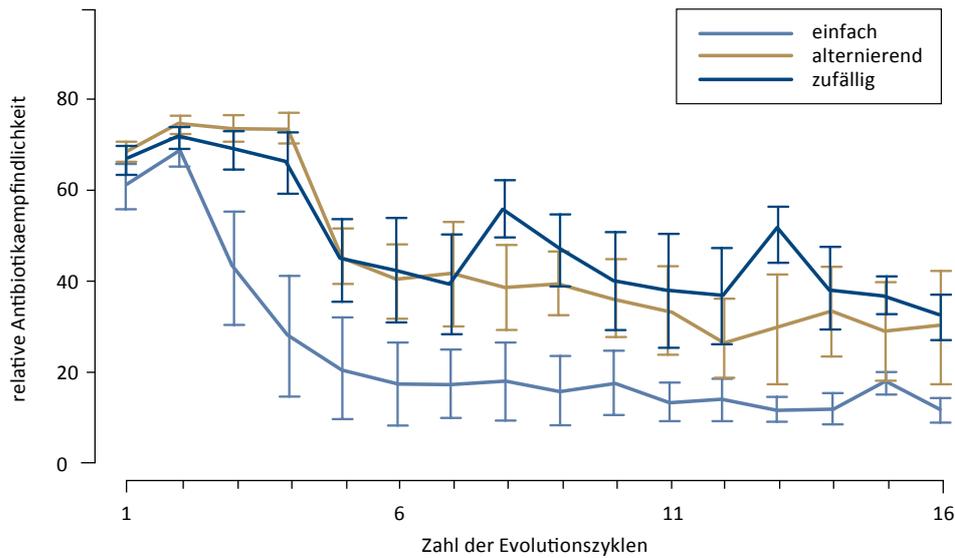
Idee, die Anwendung verschiedener Mittel zeitlich und räumlich zu variieren, um damit eine Anpassung zu verhindern oder zu verzögern.<sup>34</sup> Eine Strategie besteht darin, neue Antibiotika nur in Kombination zu verwenden.<sup>35</sup> Evolutionsexperimente im Labor liefern dabei wichtige Hinweise auf das beste Vorgehen. So wurde beispielsweise untersucht, wie sich die abwechselnde Gabe zweier in der klinischen Praxis gebräuchlicher Antibiotika-Paare auf

das Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* auswirkt.<sup>36</sup> Dieser Krankenhaus-Keim ist häufig multiresistent und kann bei immungeschwächten oder chronisch kranken Patientinnen und Patienten lebensbedrohliche Infektionen verursachen. Für die Untersuchungen wurden Evolutionsexperimente im Labor unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Dabei erwies sich der schnelle Wechsel zweier Antibiotika, das sogenannte Antibiotika-Cycling, als hochwirksam gegen den Keim und verzögerte die Resistenzbildung (Abb. 5). Andere Experimente zeigten allerdings, dass der

<sup>34</sup> Die Strategien gegen Resistenzentwicklung gelten gleichermaßen für Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft wie für Antibiotika in der Medizin; siehe REX-Consortium (2013).

<sup>35</sup> Akademie der Wissenschaften in Hamburg & Leopoldina (2013).

<sup>36</sup> Römhild et al. (2015).



**Abbildung 5:** Verlauf eines Evolutionsexperiments zur Entstehung von Antibiotika-Resistenz bei *Pseudomonas aeruginosa*. Durchgeführt wurden 16 Evolutionszyklen, bei denen eine einfache Antibiotika-Anwendung pro Zyklus mit einer strikt alternierenden Gabe zweier verschiedener Antibiotika bzw. einer zufällig alternierenden Gabe verglichen wurde. Bei der einfachen Gabe kam es schnell zu einem Abfall der Antibiotika-Empfindlichkeit, während die alternierenden Gaben die Resistenzbildung stark verzögerten. Die Kurven repräsentieren Durchschnittswerte, die Varianz zwischen Replikaten wird durch die vertikalen Balken angezeigt. Abbildung nach Römhild et al. (2015).

simultane Einsatz zweier Antibiotika die Resistenzentwicklung sogar stark beschleunigen kann, d.h., die Forschung steht hier noch am Anfang.<sup>37</sup>

Da die Entstehung von Resistenz ein grundlegender evolutionsbiologischer Prozess ist, sollte der entsprechende theoretische Kontext stärker in der Landwirtschaft sowie in der Human- und Veterinärmedizin berücksichtigt werden. Grundsätzlich handelt es sich hierbei auch um einen Parasit/Wirt-Konflikt, der mit den Methoden der Spieltheorie (Kap. 1.4.5) analysiert werden kann.

#### 1.4.2 Evolutionäre Medizin

Der Mensch ist Teil der Evolution. Diese Erkenntnis hat für die Gesundheit bzw. die Behandlung von Krankheiten eine wichtige Bedeutung. In den letzten Jahrzehnten entstand aus diesem Ansatz eine neue Disziplin, die „Evolutionäre Medizin“.<sup>38</sup> Diese versucht, aus der evolutionären

Geschichte des Menschen abzuleiten, welche biologischen Strukturen und Funktionen, aber auch welche Ernährungs- und Lebensweisen für die Gesundheit förderlich sind. Daraus ergeben sich neue Erkenntnisse für die Entstehung von Krankheiten und Therapien. Grundsätzlich ist die Erkenntnis von Bedeutung, dass sich die Biologie des Menschen deutlich langsamer verändert als Umwelt und Kultur. Diese Kluft führt zu den Zivilisationskrankheiten, die einen großen Teil der Belastung unseres modernen Gesundheitssystems ausmachen.

Dreieinhalb Milliarden Jahre dauerte es, bis sich die heutigen Organismen entwickelten. Dies schließt *Homo sapiens*, den modernen Menschen, ein, und diese Evolutionsgeschichte findet sich in jedem Menschen. Die Evolutionsbiologie liefert damit auch die wesentlichen naturwissenschaftlichen Grundlagen für die Evolutionäre Medizin. Der evolutionären Betrachtungsweise kommt eine herausragende Rolle im Verständnis der Natur des Menschen zu, des gesunden wie auch des kranken. Eine solche Evolutionäre Medi-

<sup>37</sup> Pena-Miller et al. (2013); siehe auch Kupferschmidt (2016).

<sup>38</sup> Z.B. Williams & Nesse (1991), Nesse & Williams (1996), Ganten (2008), Nesse et al. (2010).

zin ist jedoch bisher weder in der praktischen Medizin noch in der Ausbildung verankert. Die Ergebnisse des Humangenomprojekts<sup>39</sup> sowie die Erforschung der Genome und der molekularen Entwicklungen vieler anderer Arten in Verbindung mit neuartigen funktionellen Analysen von Modellsystemen und des Menschen haben rasante medizinische Fortschritte ermöglicht. Diese Erkenntnisse erfordern neue Strukturen der wissenschaftlichen Arbeit, neuartige Fragestellungen sowie ihre Aufnahme bzw. ihren Transfer in die Lehre an Hochschulen und die ärztliche Praxis.<sup>40</sup>

Die Evolutionäre Medizin sieht den Menschen in Gesundheit und Krankheit als Ergebnis seiner langen evolutionären Entwicklung. Es gibt zahlreiche Beispiele dafür, dass biologische Gegebenheiten wie etwa der aufrechte Gang oder gute Nahrungsverwertung, die unter früheren Bedingungen reproduktive Überlebensvorteile darstellten und daher selektiert wurden, den heutigen Bedingungen des Lebens noch nicht neu angepasst sind. Die Entwicklung des aufrechten Ganges hat den Menschen zwar zu einem geschickten und vielseitigen Generalisten als Jäger und Sammler gemacht, heute aber fordert dies aufgrund einer veränderten Lebensweise seinen Tribut in Form von Krankheiten der Wirbelsäule und des Skelettsystems. Waren die guten Nahrungsverwerter in Zeiten des Mangels die überlebenden Gewinner, führt dieses evolutionäre Erbe heute bei überreichem Nahrungsangebot zu Übergewicht, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes. Das Renin-Angiotensin-System (RAS) hatte evolutionär die Aufgabe, den Blutdruck unter allen Umständen durch die Retention von Salz und Wasser aufrechtzuerhalten. In der Savanne, dem Ursprungsort des *Homo sapiens*, waren Salz

und Wasser knapp und der Mensch verlor diese Ressourcen durch Hitze, körperliche Arbeit und Schweiß – ein aktives RAS half ihm zu überleben. Bei der heutigen Lebensweise und hohem Salzkonsum ist das RAS überaktiviert und der Blutdruck bei 50 Prozent der erwachsenen Bevölkerung zu hoch. Angst, Schmerzen und Fieber sind ursprünglich als Schutzmechanismen entstanden, führen heute aber häufig zu Beschwerden.

Der Mensch ist aber auch selbst noch Teil von Evolutionsprozessen, die sich erst in historischen Zeiten ergeben haben. So hat sich z.B. das Allel für Laktosetoleranz mit der Einführung agrarischer Strukturen und der Milchwirtschaft innerhalb von wenigen tausend Jahren in einigen Regionen von nahezu 0 auf 85 Prozent erhöht.<sup>41</sup> Die Laktosetoleranz ist damit auch ein direktes Beispiel für den Einfluss von Umweltveränderungen auf die gerichtete Verschiebung von Allel-Häufigkeiten. Auch die großen Pest-Pandemien im Mittelalter haben zu Verschiebungen bei Resistenz-Allelen geführt, und aktuell gibt es einen ähnlichen Effekt in Bezug auf die Entwicklung von Resistenz gegen AIDS in Afrika.

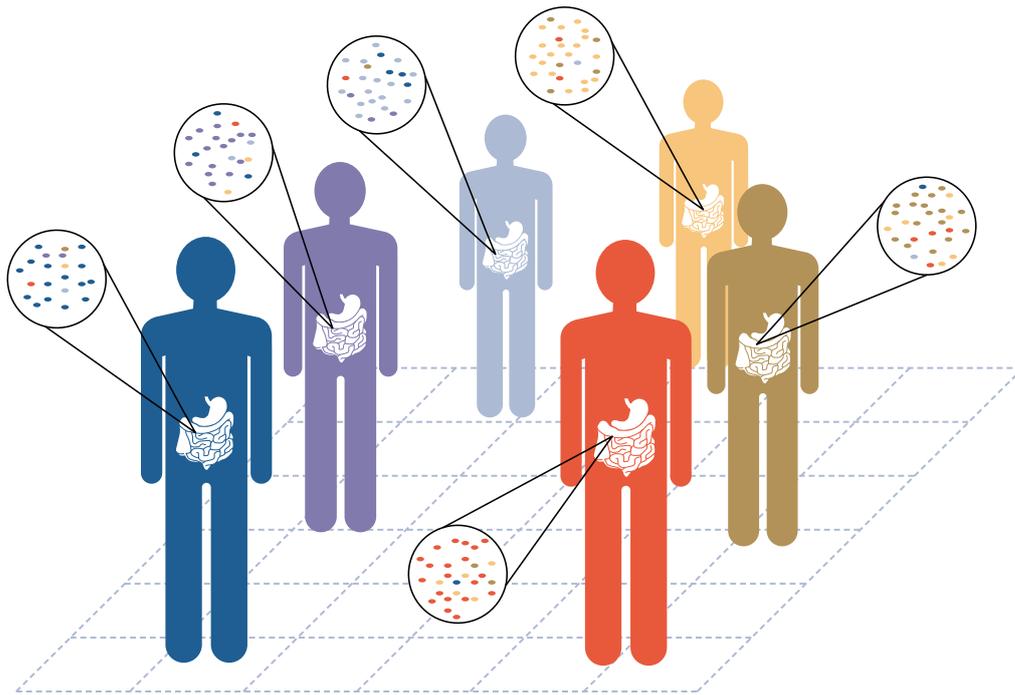
Bakterien sind allerdings nicht nur als Krankheitserreger relevant. Alle mehrzelligen Organismen, also auch der Mensch, leben in einem engen Verbund mit einer Vielzahl von Bakterien, die wichtige Funktionen übernehmen können. Daraus ist das Konzept des Meta-Organismus entstanden, demzufolge das Individuum mit seinem Mikrobiom (Gesamtheit der Mikroorganismen, die einen mehrzelligen Organismen besiedeln) interagiert.<sup>42</sup> Diese Forschung führt zu grundlegend neuen Einsichten in die Rolle der Ernährung für

41 Leonardi et al. (2011), Curry (2013).

42 Bosch & Miller (2016), siehe auch den Artikel „Mensch und Mikrobiom: Mögen die Mikroben mit uns sein!“ von Kegel (2016) in der Neuen Zürcher Zeitung, Link: <http://www.nzz.ch/feuilleton/zeitgeschehen/mensch-und-mikrobiom-moegen-die-mikroben-mit-uns-sein-ld.107915> (Stand: 10.01.2017).

39 Im Humangenomprojekt wurde in den Jahren 1990–2003 das Genom des Menschen entschlüsselt.

40 Stearns et al. (2010), Stearns (2011).



**Abbildung 6:** Die Mikroorganismen, die im Darm des Menschen vorkommen, haben starken Einfluss nicht nur auf die Verdauung, sondern auch auf das Immunsystem und die psychische Gesundheit. Jeder Mensch besitzt im Verdauungssystem eine individuelle Zusammensetzung der Mikrobengemeinschaft (in der Abbildung veranschaulicht durch die Farbgebung innerhalb der Kreise), die aus vielen tausend verschiedenen Bakterienarten besteht und auf das gesamte Wohlbefinden des Menschen großen Einfluss hat. Die Zusammensetzung der Bakterien wird u.a. durch Gene des Menschen bestimmt. Im Falle von Mutationen in diesen Genen können die Bakteriengemeinschaften gestört sein und z.B. Magenerkrankungen auslösen. Siehe z.B. Goodrich et al. (2016). Abbildung: Philipp Rausch.

die Gesundheit, aber auch in die Entstehung von Allergien und Entzündungskrankheiten des Darms, der Lunge und der Haut (Abb. 6). So ist z.B. die Entwicklung des Immunsystems von einer normalen Besiedlung des Darms durch Bakterien abhängig. Diese wird durch eine natürliche Geburt und Stillen begünstigt. Kinder, die durch Kaiserschnitt geboren wurden und nur Ersatznahrung statt Muttermilch erhalten haben, leiden häufiger unter Allergien, Asthma und Übergewicht.

Die Evolutionäre Medizin führt so zu einer ganzheitlichen Medizin, die neben der evolutionär verstandenen Biologie auch die gesamte biotische und abiotische Umwelt sowie das Verhalten des Individuums in seiner Umwelt betrachtet.

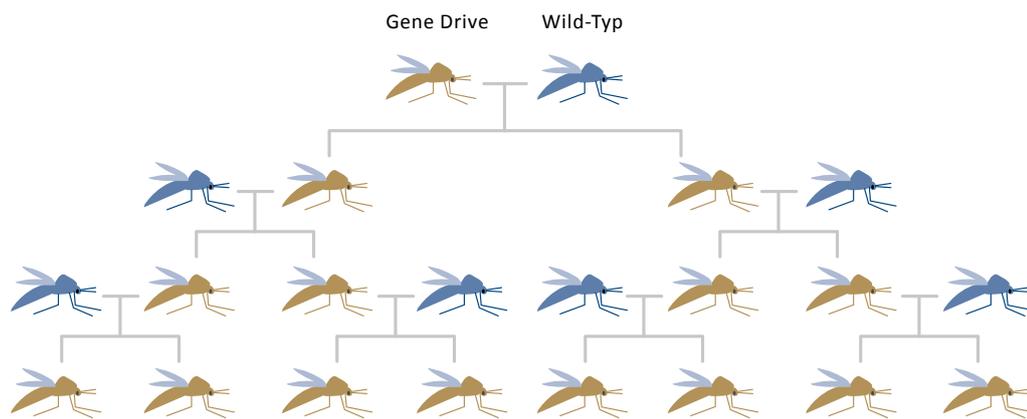
#### 1.4.3. Molekulare Abstammungsforschung

Die Abstammungsforschung war schon immer ein wesentlicher Teil der Evolutionsbiologie. Durch den Einsatz mole-

kularer Methoden findet sie zunehmend neue Anwendungsfelder.<sup>43</sup> Mit Hilfe von DNA-Sequenzvergleichen lassen sich Stammbäume rekonstruieren, die z.B. bei Grippeviren die Ursprünge der Pandemie erkennbar machen<sup>44</sup> und zum Teil sogar Aussagen über weitere Ausbrüche ermöglichen. Dadurch können rechtzeitig passende Impfstoffe produziert werden. Ebenso lassen sich auch Übertragungswege von AIDS-Viren sowie deren Resistenzentwicklung gegen Medikamente nachvollziehen. In der Ökologie kann man mit Verwandtschaftsanalysen den Ursprung invasiver Arten ermitteln oder besonders schützenswerte Populationen identifizieren. In der Medizin lässt sich der Ursprung genetischer Krankheiten bestimmen (genetische Epidemiologie). Auch Vaterschaftstests und die krimino-

<sup>43</sup> Leopoldina (2014b), S. 29–31.

<sup>44</sup> Zum Ursprung des Schweinegrippe-Erregers H1N1 siehe z.B. Smith et al. (2009).



**Abbildung 7:** Prinzip des Gene-Drive-Systems am Beispiel der Transformation einer Mückenpopulation. Veränderte Gene werden mit Hilfe einer Gen-Schere im Labor konstruiert und in ein Tier eingebracht (Gene Drive). Paart sich dieses Tier mit einem anderen, erhalten alle Nachkommen eine Kopie des neuen Gens und geben es dann selbst wieder an alle Nachkommen weiter, bis die gesamte Population das Gen übernommen hat. Wenn das genetische Element gleichzeitig eine Resistenz gegen den Malaria-Erreger (einzellige Parasiten der Gattung *Plasmodium*) vermittelt, dann kann die Mücke den Erreger auch nicht mehr an den Menschen weitergeben. Abbildung nach Esvelt et al. (2014).

logische Forensik<sup>45</sup> nutzen Erkenntnisse und molekulare Marker, die auf der Basis von Erkenntnissen der Evolutionsbiologie entwickelt wurden.

#### 1.4.4. Anwendung evolutionärer Prinzipien

Der US-Biologe Scott Carroll und seine Kollegen (2014) plädieren in einem Artikel der Fachzeitschrift *Science* dafür, evolutionsbiologische Prinzipien zu nutzen, um Problemen zu begegnen, die z.B. durch schnelle Evolution von Parasiten, Unkräutern und Krankheitserregern entstehen. Die Autoren schlagen politische Management-Maßnahmen vor wie etwa die regionale Regulierung der Anwendung von Antibiotika und Pestiziden. Um Problemen des Klimawandels entgegenzuwirken, empfehlen sie auch die genetische Veränderung von Pflanzen und Tieren für eine verbesserte Nahrungsproduktion sowie Maßnahmen zur Bekämpfung umweltinduzierter chronischer Krankheiten bis hin zur Gentherapie beim Menschen. Besondere Aufmerksamkeit soll auch dem

Verlust der Biodiversität gewidmet werden, inklusive der Chancen und Probleme von gezielten Zuchtprogrammen für vom Aussterben bedrohte Wildtiere. Vertreter der Evolutionsbiologie eröffnen damit eine politische Diskussion, in der es gilt, sich evolutionsbiologischer, medizinischer und ökonomischer Zusammenhänge bewusst zu werden, um zu zukunftsweisenden Entscheidungen zu gelangen.

Eine neue und auf evolutionären Prinzipien beruhende Anwendung sind sogenannte Gene-Drive-Systeme. Mit Hilfe von Gen-Scheren wird das Genom eines Organismus verändert, um bestimmte Eigenschaften zu erzeugen.<sup>46</sup> Mit präzisen Eingriffen lassen sich genetische Elemente generieren, die sich selbst in jeder Generation verdoppeln und sich damit exponentiell in einer Population ausbreiten.<sup>47</sup> Mittels Genom-Editierung könnten z.B. Mücken resistent gegen den Malaria-Erreger gemacht werden (Abb. 7).<sup>48</sup>

Auf diese Weise könnte die Malaria-Übertragung verhindert werden, ohne

<sup>45</sup> In dem durch die Medien bekannt gewordenen Fall der „bulgarischen Krankenschwestern“ konnte gezeigt werden, dass der betreffende HIV-Stamm bereits seit Jahren in Libyen zirkulierte und nicht durch die Angeklagten in das Land gebracht worden war; siehe de Oliveira et al. (2006). Auch kann durch die forensische Phylogenetik erklärt werden, ob Person A Person B angesteckt hat oder umgekehrt, was in einem weiteren Gerichtsverfahren von Bedeutung war; siehe Scaduto et al. (2010).

<sup>46</sup> Leopoldina (2015).

<sup>47</sup> Solche Elemente werden in der Evolutionsforschung als „Transposons“ und umgangssprachlich oft als „egoistische DNA“ bezeichnet.

<sup>48</sup> Esvelt et al. (2014).

den Zwischenwirt oder den ökologischen Kontext nennenswert zu beeinflussen.<sup>49</sup> Auch das zunehmend zur Gefahr werdende Zika-Virus<sup>50</sup> könnte mit dieser Methode bekämpft werden. Die mögliche Anwendung solcher Gene-Drive-Systeme ist umstritten und wird derzeit unter Fachleuten und in der Politikberatung diskutiert.<sup>51</sup> Dieses Beispiel zeigt, dass die Optionen, die aus evolutionsbiologischen Prinzipien ableitbar sind, zunehmend umfangreiche Rückwirkungen auf das praktische Handeln des Menschen haben. Auf die Politik und die Gesellschaft kommen folglich Entscheidungen zu, die sachgerecht nur mit einem fundierten Wissen über die genetischen, ökologischen und evolutionsbiologischen Zusammenhänge getroffen werden können.

#### 1.4.5 Evolutionäre Spieltheorie in Ökonomie und Biologie

Die Spieltheorie ist ursprünglich in der Mathematik entwickelt worden und ihre Anwendbarkeit wurde zunächst in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften gezeigt.<sup>52</sup> Anders als die Biologie unterstellt die Ökonomie aber rationales, zielorientiertes Handeln des Menschen. Die Spieltheorie befasst sich mit Modellen rationalen Handelns, wenn zwei oder mehr Akteure entscheiden und die Ergebnisse von den gewählten Handlungen aller Akteure abhängen. Ein rationaler Akteur (eine Person oder eine Firma) muss in seine Überlegungen also immer einkalkulieren, wie die anderen Akteure entscheiden werden. Im evolutionsbiologischen Kontext erfolgt die vermeintliche Auswahl von Strategien nicht durch rationale Entscheider, sondern durch einen natürlichen Selektionsprozess, wobei aber die Konfliktsituationen in der natürlichen Selektion durchaus den Entscheidungssituati-

onen in der Ökonomie entsprechen. Die beiden Wissenschaftsfelder haben sich daher gegenseitig stark befruchtet. Das in der Spieltheorie bekannte „Nash-Gleichgewicht“ hat sein evolutionsbiologisches Äquivalent in der „Evolutionär stabilen Strategie“ (ESS).<sup>53</sup> Mit dem Konzept der ESS haben Maynard Smith und Price das Nash-Gleichgewicht auf die Evolutionsbiologie übertragen sowie Anwendungen der Spieltheorie in der Evolutionsbiologie zum Durchbruch verholfen. In beiden Feldern wird die Spieltheorie genutzt, um die Zusammenhänge in Konfliktsituationen zu identifizieren und Lösungsmechanismen zu finden. Eine klassische Konfliktfrage in der Evolutionsbiologie ist zum Beispiel die Frage, wie höher organisierte Sozialformen entstehen können, wenn die Selektion doch nur das einzelne Individuum bevorteilen sollte.

Die Spieltheorie ist ein Hilfsmittel, um strategisches Denken darzustellen und mathematisch formulierbar zu machen. Ein abstraktes Spiel dient dazu, Konfliktsituationen abzubilden und Entscheidungsfindungen darzustellen. Dabei gibt es immer mindestens zwei Spieler und Spielregeln, nach denen es etwas zu gewinnen oder zu verlieren gibt (die „Auszahlung“). Das bekannteste Spiel ist in diesem Zusammenhang das „Gefangenendilemma“ (Abb. 8). Mit dem dabei angenommenen Spielszenario wird der Konflikt zwischen Kooperation und Eigeninteressen simuliert.

#### Einsatzgebiete der Spieltheorie

Arbeiten auf der Basis der Spieltheorie sind bereits mehrfach mit dem Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften ausgezeichnet worden, das erste Mal erhielten John C. Harsanyi, John F. Nash und Reinhard Selten im Jahr 1994 den Preis. In der Evolutionsbiologie wird die Spieltheorie vielfältig eingesetzt, zum Beispiel um die Ausbreitung und Verteilung von Verhaltensmustern in Tierpopulationen, die Ausbreitung

49 Gantz et al. (2015).

50 Ursprünglich im Jahr 1947 aus einem Rhesus-Affen isoliert, hat sich das Virus in den letzten 50 Jahren in seinen Protein- und Nucleotid-Sequenzen signifikant verändert; siehe Wang et al. (2016).

51 National Academy of Sciences USA (2016).

52 von Neumann & Morgenstern (1944).

53 Maynard Smith & Price (1973).



		Schweigen		Verrat	
		2 Jahre	1 Jahr	2 Jahre	5 Jahre
Schweigen	<b>KOOPERATION</b>				
	2 Jahre	5 Jahre			
Verrat	5 Jahre		4 Jahre		
			<b>EGOISMUS</b>		
		1 Jahr	4 Jahre		

**Abbildung 8:** Darstellung des Prinzips des Gefangenendilemmas. In dem Szenario werden zwei Gefangene vor die Wahl gestellt: Wenn einer gesteht und den anderen belastet, dann erhält der Gestehende nur ein Jahr Gefängnisstrafe, der andere hingegen fünf. Gestehen beide gleichzeitig, erhalten beide je vier Jahre. Gesteht keiner von beiden, dann reichen die Indizien nur für je zwei Jahre Gefängnis für jeden. Damit entsteht eine klassische Konfliktsituation, in der beide zwei Möglichkeiten haben: Verrat oder Schweigen. Die kollektiv optimale Lösung wäre, miteinander zu kooperieren und gemeinsam zu schweigen, da dann beide nur je zwei Jahre Gefängnis erhalten würden. Sucht jeder hingegen nur seinen individuellen Vorteil, werden beide je vier Jahre eingesperrt. Das Prinzip des Gefangenendilemmas steht für das generelle politische Problem der Übernutzung öffentlicher Ressourcen als Konflikt zwischen eigenen und gemeinschaftlichen Interessen. Das Problem taucht ganz praktisch in vielen Varianten auf, von der Sauberhaltung einer gemeinsam genutzten Küche bis hin zur Begrenzung der Emission von Treibhausgasen.

von Infektionen oder Mechanismen der Kooperation zwischen Individuen zu untersuchen.

Die evolutionäre Spieltheorie wird in biologischen Zusammenhängen sinnvoll angewendet, wenn die Fitness (Tab. 1) des einzelnen Individuums von anderen Individuen mit unterschiedlicher Strategie abhängig ist. Individuen einer Art verfolgen, basierend auf der Variation in genetischen Programmen, unterschiedliche Strategien im Kampf um Ressourcen oder Fortpflanzung. Die Auszahlung oder Fitness hängt unter solchen Bedingungen nicht nur von der Umwelt insgesamt ab, sondern von der Häufigkeit anderer Individuen mit anderen Strategien in der Population. Im Zuge eines evolutionären Prozesses bildet sich ein stabiles Gleichgewicht der Verteilung von Strategien heraus, d.h. ein evolutionär stabiles Gleichgewicht, das durch andere Strategien, sogenannte Mutantenstrategien, nicht mehr unterwandert werden kann.

Ein klassisches Beispiel ist der „Falke-Taube-Konflikt“, wobei die Bezeichnungen „Falke“ und „Taube“ nur bildlich für eine aggressive und eine defensive Strategie stehen, also nicht direkt für die unterschiedlichen Vogelarten. Konkuriert ein Falke mit einer Taube um Ressourcen, dann erhält immer der Falke die Ressource, während die Taube flieht. Zwei Tauben erhalten im Mittel je die Hälfte der Beute, während zwei Falken durch den Kampf im Mittel Verluste erleiden, die den Wert der umkämpften Ressource übersteigen. Offensichtlich ist, dass weder eine Population nur aus Tauben noch eine Population, die vollständig aus Falken besteht, ein stabiles Gleichgewicht aufweisen kann. Unter Tauben lohnt sich die Falkenstrategie, während unter Falken die Taubenstrategie vorteilhaft ist. Ein evolutionär stabiles Gleichgewicht erfordert einen Mix aus Falken- und Taubenstrategie. Welche Häufigkeit die beiden Strategien im Gleichgewicht aufweisen, lässt

sich berechnen. Das stabile Gleichgewicht liegt bei den Häufigkeiten, bei welchen die Fitness der Taubenstrategie-Spieler gleich der Fitness der Falkenstrategie-Spieler ist.

Heute gibt es zahlreiche Anwendungen der evolutionären Spieltheorie – nicht nur in der Verhaltensbiologie, sondern u.a. auch in der Mikrobiologie. Bestimmte Hefepilze z.B. erzeugen das Enzym Invertase, das Fructose außerhalb der Zelle aufspaltet und damit als Nährstoff zur Aufnahme in die Zelle zugänglich macht. Ein anderer Phänotyp, d.h. eine Zelle mit einer anderen genetischen Variante, verzichtet auf die kostspielige Produktion des Enzyms und verhält sich – ähnlich wie im Gefangenendilemma – als Trittbrettfahrer.<sup>54</sup> Im Gleichgewicht ergibt sich eine evolutionär stabile Mischung beider Strategien (ESS).

In der medizinischen Forschung führt die Anwendung der Spieltheorie zu völlig neuen Einsichten bei der Therapie von Krebs.<sup>55</sup> Krebszellen entstehen als unabhängige Klone.<sup>56</sup> Sie können als Parasiten innerhalb des Körpers betrachtet werden, die eine eigene evolutionäre Dynamik entwickeln. Die Bekämpfung mit Chemotherapeutika muss dabei die Entstehung von Resistenzen, d.h. die Dynamik der Entstehung und Ausbreitung von resistenten Zellen, berücksichtigen. Auch in der Krebsbehandlung liegt demnach die Herausforderung in der Lösung einer klassischen Konfliktfrage. Gegenwärtig entwickelt sich dieses Thema zu einem der aktivsten Felder, in denen Evolutionstheorie und medizinische Forschung zusammenarbeiten.<sup>57</sup>

---

54 Archetti (2009).

55 Basanta et al. (2008), Gatenby (2009); siehe auch Crespi & Summers (2005).

56 Nowell (1976).

57 Siehe z.B. den Sonderforschungsbereich Cancer Evolution an der Ludwig-Maximilians-Universität München, Link: <http://www.sfb1243.biologie.uni-muenchen.de/index.html> (Stand: 10.01.2017), und das „Centre de Recherches Ecologiques et Evolutives sur le Cancer“ in Montpellier (Frankreich), Link: <https://www.creec.fr/fr/> (Stand: 10.01.2017).

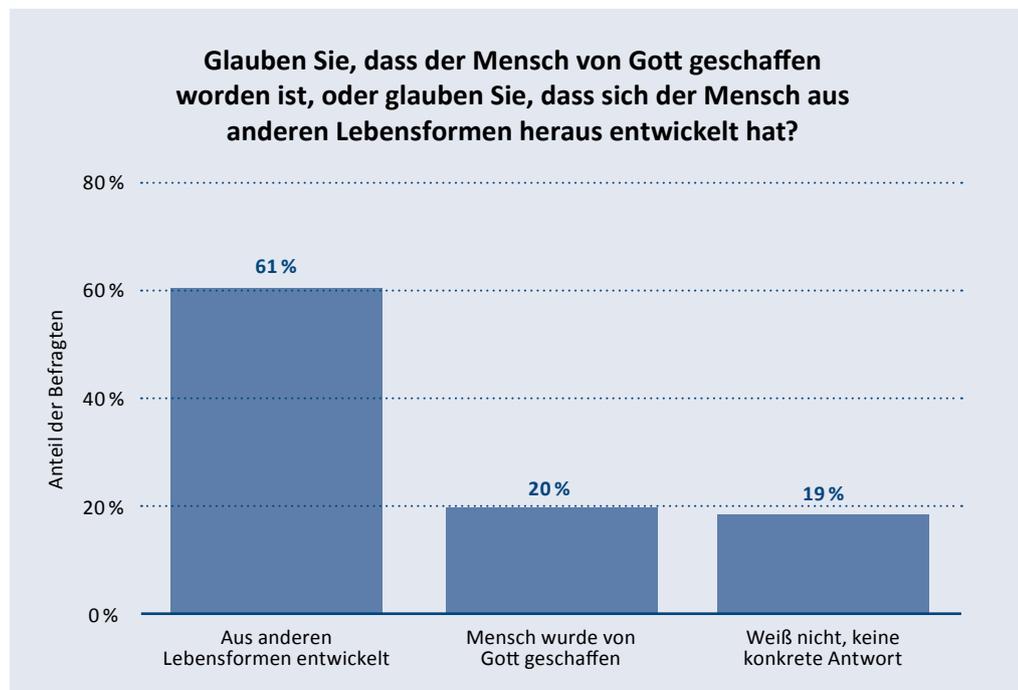
## 2. Die Evolutionsbiologie an Schulen und Hochschulen

Häufig sind selbst bei Bürgerinnen und Bürgern, die über aktuelle wissenschaftliche Themen gut informiert sind, sowohl erhebliche Mängel in ihren Kenntnissen über wissenschaftliche Vorgehensweisen als auch große Unsicherheit bei der Einschätzung wissenschaftlicher Geltungsansprüche festzustellen. Dies zeigt sich nicht zuletzt bei der öffentlichen Diskussion um Darwin und die Folgen, etwa in Aussagen wie: „Die Evolutionstheorie ist ja auch nur eine Theorie.“

Eine repräsentative Umfrage des Instituts für Demoskopie Allensbach im Jahr 2009 ergab, dass sich etwas mehr als die Hälfte der Bevölkerung bewusst

ist, dass der Mensch sich aus anderen Lebensformen entwickelt hat. Auf die Frage „Glauben Sie, dass der Mensch von Gott geschaffen worden ist, oder glauben Sie, dass sich der Mensch aus anderen Lebensformen heraus entwickelt hat?“ stimmten 61 Prozent der Befragten zu (Abb. 9). Seit dem Jahr 1970, in dem die Frage zum ersten Mal gestellt wurde (Zustimmung: 38 Prozent), hat sich der Wert kontinuierlich erhöht.

Wissenschaftliche Theorien werden kontinuierlich durch reproduzierbare Experimente bestätigt oder falsifiziert, gegebenenfalls weiterentwickelt oder gar verworfen. Diese Vorgehensweise ist der



**Abbildung 9:** Eine repräsentative Befragung durch das Institut für Demoskopie Allensbach im Jahr 2009 zeigte, dass für rund 60 Prozent der Befragten die Evolutionstheorie die Erklärung für die Abstammung des Menschen liefert. Dass der Mensch von vielen als „von Gott erschaffen“ angesehen wird, liegt auch an der Vermittlung von Bibelinhalten in der Schule. Die großen christlichen Kirchen betrachten die Bibel jedoch nicht mehr als dogmatische Aussage zur Naturgeschichte. Siehe [http://www.ifd-allensbach.de/uploads/tx\\_reportsdocs/prd\\_0905.pdf](http://www.ifd-allensbach.de/uploads/tx_reportsdocs/prd_0905.pdf) (Stand: 10.01.2017).

nicht-wissenschaftlichen Öffentlichkeit oft nicht bekannt. Da wissenschaftstheoretische Fragen und generelle Probleme ihrer Vermittlung die thematischen Grenzen dieser Stellungnahme jedoch überschreiten, werden sie im Folgenden nur indirekt angesprochen – nämlich insofern ein niedriges Niveau wissenschaftlicher Bildung besondere Schwächen im evolutionsbiologischen Wissen nach sich zieht.<sup>58</sup>

Eine Strategie zur Verbesserung der evolutionsbiologischen Ausbildung an Schulen und Hochschulen in Deutschland sollte auf einer Analyse der gegenwärtigen Situation beruhen, welche die wichtigsten Defizite identifiziert und deren hauptsächliche Ursachen benennt.

Eine solche Analyse sollte insbesondere zwei Aspekte berücksichtigen: spezielle Faktoren, welche die Einbeziehung wissenschaftlicher Erkenntnisse in das Selbstverständnis des Menschen betreffen, und strukturelle Faktoren, die sich in Form der Schulen und Hochschulen auf die Ausbildung von Schülerinnen und Schülern sowie Studierenden auswirken.

#### **Spezielle Faktoren für die Ausbildung eines wissenschaftlich fundierten Selbstverständnisses**

Faktoren, welche die Einbeziehung wissenschaftlicher Erkenntnisse in das Selbstverständnis des Menschen betreffen, erhalten im Falle evolutionsbiologischer Kausalmodelle für die Entstehung menschlicher Eigenschaften eine besondere Brisanz. Dabei überdeckt die Frage, „ob der Mensch wirklich vom Affen abstamme“, nicht mehr die komplexeren Probleme einer Anwendung der Evolutionsbiologie auf Phänomene des mensch-

lichen Daseins.<sup>59</sup> Auch die Verbreitung des Kreationismus und von Theorien des Intelligent Design scheint in Deutschland – anders als in den Vereinigten Staaten – nicht das entscheidende Hindernis bei der Verbreitung der Erkenntnisse der Evolutionsbiologie zu sein. Mit zunehmender Nähe zur Schulpraxis gelangen die Expertinnen und Experten allerdings zu stärker warnenden Einschätzungen.<sup>60</sup> Für die Verbesserung des evolutionsbiologischen Bildungsniveaus in Deutschland ist eine andere Problematik von größerer Bedeutung. Das wesentliche Hindernis (z.B. im Rahmen der Soziobiologie, der evolutionären Psychologie und der evolutionären Ethik) liegt vor allem darin, dass durch ein evolutionsbiologisches Verständnis tief im Common Sense verankerte Grundeinstellungen problematisiert werden, die häufig auf zwei komplementären Denkweisen beruhen.<sup>61</sup> Einerseits werden lebensweltliche Erfahrungen auf evolutionäre Prozesse übertragen, sodass z.B. die bewusst geplante und zielgerichtet durchgeführte Konstruktion (nach dem Vorbild des Ingenieurs) als einzige Möglichkeit für die Entstehung komplexer Systeme betrachtet wird. Andererseits wird ein Wesensunterschied zwischen Körper und Geist bzw. Natur und Kultur behauptet, der es von vornherein sinnlos erscheinen lässt, naturwissenschaftliche Erklärungen für Phänomene der geistigen und kulturellen Existenz des Menschen zu suchen.<sup>62</sup>

Die Evolutionsbiologie als Quelle kausaler Erklärungen für kognitive, soziale und ethische Aspekte des menschlichen

<sup>58</sup> Siehe für weitergehende Informationen zum Stand der naturwissenschaftlichen Bildung in Deutschland die Homepage des IPN – Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik <http://www.ipn.uni-kiel.de/de> (Stand: 10.01.2017) und das Online-Portal der MINT(Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik)-Initiativen in Deutschland <http://www.mintzukunftschaften.de/> (Stand: 10.01.2017).

<sup>59</sup> Allerdings spielt die Evolutionsbiologie in diesem Kontext bei der kritischen Analyse von Versuchen, Rassebegriffe zwecks pseudowissenschaftlicher Einteilungen der Menschen zu verwenden, gegenwärtig eine wichtige Rolle; siehe Hofffeld (2011).

<sup>60</sup> Graf & Lammers (2011). Für eine ausführliche Auseinandersetzung mit dem Kreationismus/Intelligent Design in Deutschland siehe Neukamm (2009).

<sup>61</sup> So etwa der lamarckistische Einsatz von Erklärungsmustern für kulturelles Lernen aus Erfahrung bei der falschen Prognose evolutionärer Anpassungen; siehe Johannsen & Krüger (2005).

<sup>62</sup> Siehe am Beispiel der Selbstwahrnehmung des Menschen als ein frei handelndes Individuum Voland (2007).

Daseins bildet eine breite und vielschichtige Thematik. Im Folgenden wird diese aber nur berücksichtigt, insofern aus ihr Einsichten über wesentliche Hindernisse für die Vermittlung der Evolutionsbiologie in Schulen und Hochschulen zu gewinnen sind. Dies trifft insbesondere bei Schwierigkeiten in der fundierten Darstellung evolutionärer Mechanismen und Prozesse zu, die hohe Anforderungen an Abstraktions- und Veranschaulichungsfähigkeit von Lehrenden und Lernenden stellt.

#### **Strukturelle Faktoren für die institutionelle Unterstützung der evolutionsbiologischen Wissensvermittlung**

Im Zentrum der folgenden qualitativen Lageanalyse steht die institutionelle Organisation an Hochschulen und Schulen. Damit können – trotz der erheblichen Unterschiede zwischen den Schul- und Hochschulstandorten infolge des bildungspolitischen Föderalismus der Bundesrepublik – verallgemeinerungsfähige Aussagen über die institutionellen Randbedingungen der schulischen und universitären Vermittlung der Evolutionsbiologie in Deutschland getroffen werden.

### **2.1 Fachwissenschaftliche Ausbildung**

Die Diskrepanz zwischen der wissenschaftlichen Bedeutung der Evolutionsbiologie und ihrer akademischen Präsenz beruht zu einem großen Teil darauf, dass es an deutschen Hochschulen zu wenige Forscherinnen und Forscher gibt, welche die moderne Evolutionsbiologie vertreten. Obwohl seit Ernst Haeckel und August Weismann deutsche Biologen bei der Rezeption und Weiterentwicklung der Darwin'schen Evolutionsbiologie eine wichtige Rolle gespielt haben,<sup>63</sup> sind die Evolutionsbiologie im Allgemeinen und die evolutionstheoretische Grundlagen-

forschung im Besonderen in Deutschland nach der nationalsozialistischen Diktatur über Jahrzehnte hinweg vernachlässigt worden. Lange Zeit haben sich insbesondere die wesentlichen Fortschritte, die sich mit der Entwicklung der Neutralen Evolutionstheorie, der Populationsgenetik, der quantitativen Genetik des Phänotyps und der Spieltheorie ergeben haben, nur wenig auf die Besetzung und Schaffung von Lehrstühlen ausgewirkt.

In den letzten 15 Jahren sind jedoch zunehmend Lehrstühle zum Thema bzw. mit Bezug zur Evolutionsbiologie eingerichtet worden. Auch ist in der deutschen Forschungslandschaft die Evolutionsbiologie durch außeruniversitäre Forschungseinrichtungen auf verschiedenen Feldern gestärkt worden (Tab. 3 und Abb. 10).

<sup>63</sup> Siehe einführend Richards (2011).

**Tabelle 3:** Evolutionsschwerpunkte an Universitäten und an außeruniversitären Einrichtungen (alphabetisch nach Standorten). Genannt sind Standorte, an denen mehrere Programme bzw. Lehrstühle und Abteilungen zu evolutionsbiologischen Themen existieren, sodass eine erkennbare Schwerpunktsetzung entsteht (Stand: Juni 2016).

Standort	Evolutionsbiologische Schwerpunktsetzung
<b>Universitäten</b>	
Freie Universität Berlin	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 6 Abteilungen mit evolutionsbiologischer Denomination</li> <li>· MSc in Biodiversity, Evolution, Ecology</li> <li>· Graduate Program in Biodiversity, Evolution and Ecology</li> </ul>
Goethe-Universität Frankfurt (Main)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 5 Abteilungen mit evolutionsbiologischem Schwerpunkt am Institut für Ökologie, Evolution und Diversität</li> <li>· englischsprachiger MSc in Ecology and Evolution</li> </ul>
Christian-Albrechts-Universität Kiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 7 Abteilungen in Biologie und Medizin mit evolutionsbiologischem Schwerpunkt</li> <li>· englischsprachiger MSc in Molecular Biology and Evolution</li> <li>· Sonderforschungsbereich (SFB) zum Thema „Evolution von Metaorganismen“</li> <li>· internationale Graduiertenschule für Evolutionsbiologie (International Max-Planck-Research School – IMPRS – for Evolutionary Biology – zusammen mit GEOMAR und dem Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie, Plön)</li> </ul>
Westfälische Wilhelms-Universität Münster	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 5 Abteilungen mit evolutionsbiologischem Schwerpunkt am Institut für Evolution und Biodiversität (IEB)</li> <li>· MSc Special Study Program in Evolution and Biocomplexity (Schwerpunkt innerhalb des Master-Studiengangs Biowissenschaften)</li> <li>· Internationale Graduiertenschule Münster – „Evolutionäre Prozesse in Adaptation und Krankheit“</li> </ul>
Ludwig-Maximilians-Universität München	<ul style="list-style-type: none"> <li>· englischsprachiger MSc in Evolution, Ecology and Systematics</li> <li>· internationale Graduiertenschule für Evolutionary Genomics, Ecology and Systematics</li> <li>· Sonderforschungsbereich (SFB) zum Thema „Evolution von Krebszellen“</li> </ul>
Universität Potsdam	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 5 Abteilungen mit evolutionsbiologischem Schwerpunkt</li> <li>· MSc in Ökologie, Evolution und Naturschutz</li> <li>· institutsübergreifender universitärer Forschungsschwerpunkt Funktionelle Ökologie und Evolution</li> </ul>
Eberhard-Karls-Universität Tübingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Graduiertenprogramm EVEREST – „Evolution and Ecology Research School Tübingen“</li> </ul>
<b>Max-Planck-Gesellschaft</b>	
Max-Planck-Institut für Evolutionäre Anthropologie, Leipzig	<ul style="list-style-type: none"> <li>· interdisziplinäres Institut zur Erforschung des Verhaltens sowie der biologischen und kulturellen Evolution des Menschen</li> <li>· 2 von 5 Abteilungen mit Schwerpunkten in evolutionsbiologischen Fragestellungen</li> <li>· International Max-Planck Research School (IMPRS) „The Leipzig School of Human Origins“ zusammen mit der Universität Leipzig</li> </ul>
Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie, Plön	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Grundlagenforschung in der Evolutionsbiologie</li> <li>· alle 3 Abteilungen mit Schwerpunkten in evolutionsbiologischen Fragestellungen</li> <li>· International Max-Planck Research School (IMPRS) for Evolutionary Biology, zusammen mit der Universität Kiel und GEOMAR</li> </ul>
Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte, Jena	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Institut zur Erforschung der Geschichte der Menschheit mit Fokus auf modernen analytischen Methoden</li> <li>· Abteilungen zur Archäogenetik, Archäologie und Sprach- und Kultur-evolution</li> </ul>
Max-Planck-Institut für Ornithologie, Seewiesen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· verhaltensbiologisch ausgerichtetes Institut mit Schwerpunkt Ornithologie</li> <li>· 2 von 4 Abteilungen mit Schwerpunkten in evolutionsgenetischen und evolutionsökologischen Fragestellungen</li> </ul>

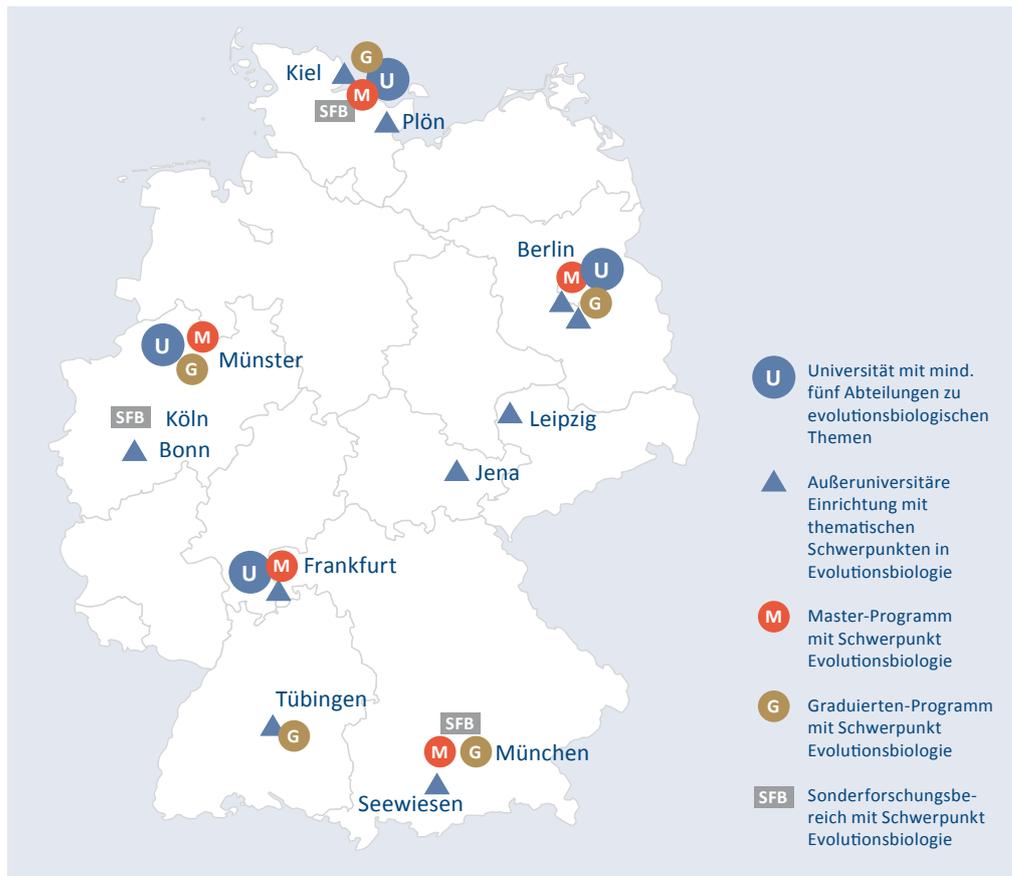
Standort	Evolutionsbiologische Schwerpunktsetzung
Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie und Friedrich-Miescher-Labor (FML), Tübingen	<ul style="list-style-type: none"> <li>· entwicklungsbiologisch und molekulargenetisch ausgerichtetes Institut</li> <li>· 2 von 6 Abteilungen sowie 3 Forschungsgruppen am FML mit Schwerpunkten in evolutionsbiologischen Fragestellungen</li> </ul>
<b>Leibniz-Gemeinschaft</b>	
Museum für Naturkunde, Berlin – Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Forschungsmuseum mit Sammlungsauftrag und Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>· interdisziplinärer Schwerpunkt zum Thema „Evolution und Geoprozesse“</li> <li>· Beteiligung am Konsortium „Berlin Center for Genomics in Biodiversity Research“</li> </ul>
Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung, Berlin	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Forschungsinstitut zur Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen des Artenschutzes</li> <li>· 3 von 5 Abteilungen mit Schwerpunkt in evolutionsbiologischen Themen</li> <li>· Beteiligung am Konsortium „Berlin Center for Genomics in Biodiversity Research“</li> </ul>
Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (Frankfurt, Dresden, Müncheberg, Wilhelmshaven, Görlitz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Forschungsinstitute und Naturmuseum mit Sammlungsauftrag und Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>· evolutionsbiologische Schwerpunkte in Taxonomie und Systematik, Evolution und Biogeographie, Evolution und Klima, Adaptation und Klima, Evolution des Menschen und seiner Paläoumweltbedingungen</li> </ul>
Zoologisches Forschungsmuseum Alexander Koenig, Bonn	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Forschungsmuseum mit Sammlungsauftrag und Öffentlichkeitsarbeit</li> <li>· evolutionsbiologische Schwerpunkte in Taxonomie und Molekularer Biodiversitätsforschung</li> </ul>
<b>Helmholtz-Gemeinschaft</b>	
GEOMAR, Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>· interdisziplinäres Institut für Meeresforschung mit Schwerpunktbereich Marine Ökologie</li> <li>· 2 von 5 biologischen Abteilungen mit evolutionsbiologischer Ausrichtung</li> <li>· International Max-Planck Research School (IMPRS) for Evolutionary Biology, zusammen mit der Universität Kiel und dem Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie</li> </ul>

Nicht zuletzt hat die Konferenz Biologischer Fachbereiche im Fachkanon Biologie<sup>64</sup> die Evolutionsbiologie als integralen Bestandteil jeder Bachelor-Ausbildung in Deutschland benannt. Ebenso weist die Kultusministerkonferenz (KMK) Evolution als verbindlichen fachlichen Inhalt für das Studium aller Lehrämter des Faches Biologie in ihren Standards *Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung* aus.<sup>65</sup>

Trotzdem sind an den Hochschulen Umfang und Intensität der evolutionsbiologischen Ausbildung stark von den fachlichen Interessen und Eigeninitiativen des Lehrpersonals abhängig. Bestehende oder in Planung befindliche (Master-) Studiengänge, welche die Evolutionsbiologie explizit als Leitfaden des gesamten Studiums einsetzen (etwa in Kiel, München, Münster und Potsdam – Tab. 3), sind noch selten bzw. unzureichend verankert. Wenn es außerhalb spezialisierter Studiengänge zu Versuchen eines integrativen Einsatzes der Evolutionsbiologie kommt, geschieht dies meist durch eigenständiges Engagement einzelner Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, das sich in der Veranstaltung von Ringvor-

64 <http://www.kbf.uni-halle.de/fachkanonbiologie.html> (Stand: 10.01.2017).

65 Siehe KMK (2010), Link: [http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2008/2008\\_10\\_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2008/2008_10_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf) (Stand: 10.01.2017).



**Abbildung 10:** Übersicht über Universitäten und Forschungseinrichtungen in Deutschland mit speziellen Forschungsprogrammen zur Evolutionsbiologie. Es wird deutlich, dass in einigen Bundesländern und Regionen ein größerer Nachholbedarf besteht (Stand: Juni 2016).

lesungen und Spezialseminaren oder der Bildung von kleineren Arbeitsgruppen niederschlägt.

Trotz der insgesamt weiterhin unbefriedigenden Situation in der evolutionsbiologischen Lehre an deutschen Hochschulen können in den letzten Jahren Ansätze zu einer Verbesserung diagnostiziert werden. Das Bewusstsein, dass die Evolutionsbiologie den Integrationsrahmen der Lebenswissenschaften bildet, hat sich in den Hochschulen verstärkt.<sup>66</sup> Dabei ist eine deutliche Zweiteilung in der deutschen Hochschullandschaft festzustellen (Abb. 10):

<sup>66</sup> Hier ist insbesondere die Förderinitiative „Evolutionsbiologie“ inklusive der Teilinitiative „Curriculum Evolutionsbiologie – Wettbewerb für innovative Ausbildungskonzepte“ der VolkswagenStiftung hervorzuheben, die dank ihrer Förderung zahlreicher zwar lokaler, aber national ausstrahlender Projekte wichtige Impulse gegeben hat; siehe Bild der Wissenschaft Plus (2009) und Hollricher (2009).

- Nur an wenigen Standorten gibt es eine weithin sichtbare Schwerpunktsetzung durch die Etablierung evolutionsbiologischer Lehrstühle und die Einbindung in einen Kontext, der die Einwerbung von weiteren Drittmitteln ermöglicht.
- An den meisten Standorten wird die Evolutionsbiologie hingegen ohne Sichtbarkeit nach außen in der Breite der biologischen Fachrichtungen gelehrt, und in der Lehrerausbildung oft mit veralteten Inhalten.

Diese strukturelle Divergenz steht im Gegensatz zu der notwendigen Breite, mit der die moderne Evolutionsbiologie aufgrund ihrer oben erläuterten wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung gelehrt werden sollte. Dies gilt insbesondere auch für die universitäre fachwissenschaftli-

che Ausbildung zukünftiger Lehrkräfte.<sup>67</sup> Auch Fakultäten, die keinen Schwerpunkt für Evolutionsbiologie ausbauen können, sollten demnach Wege finden, die Anforderungen an die evolutionsbiologische Lehre abzudecken. Ansonsten ist zu befürchten, dass die Konzentration der evolutionsbiologischen Forschung an wenigen Standorten die wesentliche integrative Wirksamkeit der Evolutionsbiologie in der fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Lehrerausbildung beeinträchtigt und in der Folge dann auch die zukünftigen Biologielehrkräfte nicht in der Lage sein werden, diese in ihrem Unterricht zu vermitteln.

## 2.2 Fachdidaktische Ausbildung

Der Fachdidaktik Biologie kommt bei der Verbreitung evolutionsbiologischer Kenntnisse unter Schülerinnen und Schülern und damit langfristig in der gesamten Bevölkerung eine zentrale Rolle zu. Die fachdidaktische Ausbildung zukünftiger Biologielehrkräfte bildet die zentrale Schnittstelle, um Erkenntnisse wissenschaftlicher Forschung schulisch zu vermitteln. Aus diesem Grund wirkt eine Verbesserung der fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Ausbildung in Bezug auf evolutionsbiologische Inhalte in zwei Richtungen: Sie verbessert die Stellung der Evolutionsbiologie nicht nur an Schulen, sondern auch an den Hochschulen.<sup>68</sup>

### Aktuelle Lage der fachdidaktischen Lehre an den Hochschulen

Die Lage in der Fachdidaktik spiegelt im kleineren Maßstab die Situation der evolutionsbiologischen Lehre insgesamt

wider: Die Studierenden zeigen großes Interesse an der Evolutionsbiologie, aber das Lehrangebot ist auch hier häufig von individuellen Forschungsinteressen der Lehrenden abhängig. Hinzu kommt, dass aufgrund des Mangels an evolutionsbiologischem Wissen seitens der Studierenden die fachdidaktische Ausbildung hier sehr schnell an ihre Grenzen stößt. Außerdem besteht eine starke Orientierung der fachdidaktischen Hochschulausbildung an den Schulcurricula, die für den Biologieunterricht im jeweiligen Bundesland festgelegt sind. In den Lehrplänen für den Biologieunterricht in der Sekundarstufe I und II wurden im letzten Jahrzehnt in fast allen Bundesländern evolutionsbiologische Inhalte verankert.<sup>69</sup> Das große Defizit in den Lehrplänen von Gymnasien, Sekundarschulen sowie Haupt- und Realschulen besteht jedoch weiterhin darin, dass die Evolutionsbiologie nicht als grundlegendes integratives Prinzip für den Biologieunterricht berücksichtigt wird. Vielmehr wird sie weiterhin als ein Themengebiet der Biologie neben anderen behandelt. In der gymnasialen Oberstufe sind zwar die Basiskonzepte „Geschichte und Verwandtschaft“ sowie „Variabilität und Anpasstheit“ durch die (bundes-) einheitlichen Anforderungen an Abiturprüfungen für jeden Biologieunterricht der Oberstufe verbindlich.<sup>70</sup> Bisher gibt es aber keine empirisch geprüften Modelle dafür, wie das Unterrichten mit diesen Basiskonzepten zum Aufbau evolutionsbiologischen Wissens beitragen kann.

### Aktuelle Stellung der Evolutionsbiologie an den Schulen

Die Position der Evolutionsbiologie im Lehramtsstudium wird sehr stark von ihrer faktischen Rolle in der Schule und den dortigen Veränderungen beeinflusst. Als positive Entwicklung gilt zum einen die Einführung des Basiskonzepts „Entwicklung“ für die Sekundarstufe I in den Bildungs-

<sup>67</sup> Befunde der Lehrerprofessionsforschung zeigen für angehende Lehrkräfte der Biologie einen hohen Zusammenhang zwischen fachlichem und fachdidaktischem Wissen; siehe Großschedl et al. (2015); Kleickmann et al. (2014). Eine fundierte evolutionsbiologische Ausbildung ist notwendige Voraussetzung für die Entwicklung fachdidaktischen Wissens über die Vermittlung der Evolutionsbiologie.

<sup>68</sup> Siehe für eine Übersicht zu den Grundlagen der Fachdidaktik Biologie Gropengießer et al. (2013).

<sup>69</sup> KMK (2005).

<sup>70</sup> KMK (2004).

standards der KMK im Jahr 2004 im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss. Ebenso ist auch die Verpflichtung zur Konzentration auf das biologische Prinzipienwissen als positiv zu bewerten.<sup>71</sup> Allerdings werden die Vorgaben der Bildungsstandards im Unterricht vielerorts nicht umfassend umgesetzt. Außerdem ist insgesamt keine wesentliche Steigerung des Anteils der Evolutionsbiologie am Schulunterricht festzustellen, da der zu bewältigende Stoff aus Molekularbiologie, Genetik und Ökologie zugenommen hat. Diese Ambivalenz erschwert die fachdidaktische Akzentuierung der Evolutionsbiologie und verunsichert die Lehramtsstudierenden.

Die Schulbuchsituation hat sich in den letzten Jahren hinsichtlich der evolutionsbiologischen Bildung verbessert. Allerdings gibt es bundesweit immer noch kein Lehrbuch, das der Evolutionsbiologie als Integrationsrahmen für die lebenswissenschaftliche Bildung gerecht wird. Dies führt dazu, dass sich die Ausbildung der zukünftigen Lehrerinnen und Lehrer sehr stark an den jeweils vor Ort erarbeiteten Lehrmaterialien abseits der Schulbücher orientieren muss. Eine kontinuierliche Unterstützung der Fachdidaktik durch eine außerschulische und außeruniversitäre Förderung ging hiervon aber nicht aus. Bisher fehlen beispielsweise jegliche national koordinierten, strukturierten fachdidaktischen Programme zur schulischen Aufwertung der Evolutionsbiologie, obwohl aus der Didaktik der Biologie heraus bereits fundierte Vorschläge zur curricularen Umsetzung vorgelegt wurden.<sup>72</sup>

Außerhalb der Biologie spielt die Evolutionsbiologie in der Lehrerbildung, etwa in geistes- und sozialwissenschaftlichen Schulfächern sowie in Mathematik und Physik, praktisch keine Rolle. Hier werden allenfalls sporadisch Sonderlehrveranstaltungen angeboten. Solche Akti-

vitäten sind stark von außeruniversitären Impulsen abhängig. Ein Beispiel hierfür ist das Darwin-Jubiläumjahr 2009,<sup>73</sup> das zwar zahlreiche sehr gut besuchte Veranstaltungen und Projekte angeregt, aber nur selten zu kontinuierlichen Bemühungen geführt hat, das hohe Interesse an Evolutionsbiologie in der Lehre aufzugreifen.

#### **Vorschläge zur Weiterentwicklung der biologiedidaktischen Hochschullehre**

In den letzten Jahren forderten Fachdidaktikerinnen und -didaktiker verstärkt, die Evolutionsbiologie nicht erst kurz vor dem Abitur als Sonderthema im Schulunterricht zu behandeln, sondern sie bereits ab der 5. Klasse explizit als eigenständigen Themenkomplex einzuführen und als Strukturierungsprinzip für den gesamten Biologieunterricht einzusetzen. Darüber hinaus sollte sie bereits in der Primarstufe durch ausgewählte Inhalte im Sachunterricht angebahnt werden.<sup>74</sup> Erst dies würde die Bedeutung der Evolutionsbiologie nicht nur für die fachdidaktische, sondern auch für die fachwissenschaftliche Ausbildung der Lehramtsstudierenden gemäß ihrem zentralen Stellenwert innerhalb der Lebenswissenschaften angemessen erhöhen. Einen ersten Vorschlag in diese Richtung hat Schleswig-Holstein im Jahr 2016 mit den neuen Fachanforderungen ausgearbeitet. Hier wird Evolution als Leitlinie für den Biologieunterricht im Gymnasium ab dem Beginn der Sekundarstufe eingeführt und durchgehend bis zum Abitur als integrativer Rahmen behandelt.<sup>75</sup> Entsprechend wurde die Evolution auch in der biologiedidaktischen Ausbildung zukünftiger Gymnasiallehrkräfte als Leitlinie festgelegt.<sup>76</sup>

<sup>73</sup> Im Darwin-Jubiläumjahr 2009 wurde der 200. Geburtstag Darwins und der 150. Geburtstag seines Werkes *On the origin of species* gefeiert.

<sup>74</sup> Siehe z.B. die Evokids-Initiative zur Etablierung evolutionsbiologischer Inhalte in der Grundschule: <http://evokids.de/sites/evo/files/evokids-resolution.pdf> (Stand: 10.01.2017).

<sup>75</sup> Zu finden unter: <http://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=199> (Stand: 10.01.2017).

<sup>76</sup> Die Fachanforderungen Biologie stellen in Schleswig-Holstein die verbindliche Grundlage für das an Schulen zu entwickelnde Fachcurriculum Biologie dar.

<sup>71</sup> Siehe hierzu MNU (2006).

<sup>72</sup> Siehe u.a. Harms et al. (2004), Kattmann (2003).

Wird die Bedeutung der Evolutionsbiologie für die gesamten Lebenswissenschaften ernst genommen, sollte ihr im Schulunterricht ein weitaus größerer Platz eingeräumt werden als bisher.<sup>77</sup> Das setzt voraus, dass den zukünftigen Biologielehrkräften während ihrer fachdidaktischen Ausbildung vermittelt wird, die Evolutionsbiologie explizit als integrativen Rahmen für biologisches Wissen im Unterricht einzusetzen. Es ist daher ein nicht zu übersehendes Defizit, wenn im fachwissenschaftlichen Anteil des Lehramtsstudiums die Grundprinzipien und Mechanismen der Evolution nur am Rande von verschiedenen spezialisierten Lehrveranstaltungen behandelt werden. Auf diese Weise kann bei den Studierenden kein einheitliches Verständnis des Evolutionsprozesses und der ihm zugrunde liegenden Mechanismen entstehen.<sup>78</sup> Dies aber ist notwendige Voraussetzung dafür, dass eine entsprechende fachdidaktische Ausbildung erfolgen kann. Der Fachdidaktik kommt dann einerseits die Aufgabe zu, aufbauend auf einem soliden biologischen Fachwissen der Studierenden nachgewiesene Lernhindernisse zur Evolutionsbiologie in den verschiedenen Altersstufen aufzuzeigen.<sup>79</sup> Andererseits muss sie Instruktionsstrategien und Unterrichtsmodelle vermitteln, die speziell für den evolutionsbiologischen Schulunterricht in den verschiedenen Klassenstufen genutzt werden können.<sup>80</sup> Die biologische und die biologiedidaktische Ausbildung zukünftiger Lehrkräfte an den Hochschulen muss bei dieser Aufgabe Hand in Hand gehen und aufeinander abgestimmt werden. Gleichzeitig müssen die

Vorgaben für den Biologieunterricht in der Schule (Curricula, Bildungspläne) hiermit harmonisiert werden. Auch die Auseinandersetzung mit dem Kreationismus und den Lehren des Intelligent Design sollte im Zusammenhang mit der Evolutionsbiologie zum Thema der biologiedidaktischen Ausbildung an den Hochschulen gemacht werden, da sie die Voraussetzung dafür bildet, dass diese Thematik auch in den Schulen nicht vernachlässigt, sondern professionell von den Biologielehrkräften thematisiert wird.<sup>81</sup>

---

<sup>77</sup> Dreesmann et al. (2011).

<sup>78</sup> Siehe zum fachdidaktischen Wissensstand von Biologielehrkräften bezüglich der Vermittlungsschwierigkeiten der Evolutionsbiologie Dijk & Kattmann (2010); siehe zum biologischen und biologiedidaktischen Wissensstand Lehramtsstudierender in Deutschland Großschedl et al. (2015) und Großschedl et al. (2014a) und zu deren Zusammenhängen Großschedl et al. (2014b).

<sup>79</sup> Vgl. u.a. Hammann & Asshoff (2014), Basel et al. (2013).

<sup>80</sup> Siehe u.a. Zabel & Gropengießer (2011), Rosengren et al. (2012), Neubrand & Harms (2016), Neubrand et al. (2016), Weiss et al. (2017).

---

<sup>81</sup> Anregungen für den Unterricht zu diesem Thema bietet Kattmann (2000).

### 3. Handlungsempfehlungen

Die folgenden Empfehlungen verfolgen das Ziel, die evolutionsbiologische Ausbildung an Schulen und Hochschulen grundsätzlich zu erneuern und dem internationalen Stand anzupassen. Die Vorschläge konzentrieren sich auf eine Veränderung der Strukturen und Inhalte, d.h. auf die Organisation der fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Ausbildung an Hochschulen und die Vermittlung evolutionsbiologischer Themen an Schulen. Die Handlungsempfehlungen resultieren aus einer zugrunde liegenden Strategie, die im Folgenden kurz erläutert wird.

#### Strategie, Leitidee und Ziele

Die Situation bezüglich der evolutionsbiologischen Lehre an Hochschulen und Schulen ist bundesweit sehr uneinheitlich, ebenso die Adressatenkreise. Dies erfordert eine Strategie, welche die Problematik an Schulen und Hochschulen koordiniert angeht. Die leitende Idee dieser Strategie ist, dass sich koordinierte Verbesserungen in Schule und Hochschule gegenseitig verstärken: Weitet sich der evolutionsbiologische Unterricht an Schulen aus, wird die wissenschaftliche Vertiefung an den Hochschulen erleichtert. Verbessert sich das evolutionsbiologische Lehrangebot an den Hochschulen, fördert dies die fachwissenschaftlich-fachdidaktischen Kompetenzen der Lehrerinnen und Lehrer. Um diesen Effekt zu erreichen, müssen die Curricula entsprechend erneuert werden. Die Empfehlungen dieser Stellungnahme richten sich daher vor allem an die Hochschulen, die KMK, die Kultusministerien der Bundesländer sowie an die Institutionen der Lehrerfortbildung.

Die im Folgenden vorgeschlagene Strategie zielt darauf ab, Schwerpunkte für Verbesserungsmaßnahmen in verschiedenen institutionellen Kontexten aufzuzeigen. Deshalb geht die Strategie von wesentlichen Defiziten der momentanen Situation aus, die in der Lageanalyse identifiziert wurden, und gibt für diese gesonderte Handlungsempfehlungen. Die aufgeführten Defizite und Empfehlungen sind gemäß den folgenden Zielen angeordnet, die parallel verfolgt werden sollten:

1. den gegenwärtigen Stand der evolutionsbiologischen Ausbildung umfassend zu erheben und positive Tendenzen zu fördern,
2. die Evolutionsbiologie curricular und fachdidaktisch als integrativen Rahmen des Biologieunterrichts zu etablieren und
3. die Evolutionsbiologie als Grundlage der Lebenswissenschaften und als transdisziplinäres Forschungsprogramm an den Hochschulen zu stärken.

#### 3.1 Den gegenwärtigen Stand der evolutionsbiologischen Ausbildung umfassend erheben und positive Tendenzen fördern

Im Folgenden werden Maßnahmen vorgeschlagen, die

1. an der evolutionsbiologischen Ausbildung in Schule und Hochschule ansetzen,
2. die begrüßenswerten Veränderungen unterstützen, die in den letzten Jahren zu verzeichnen sind, und damit
3. auf Dauer das Wissen zur Evolutionsbiologie in Gesellschaft, Politik und Wissenschaft fördern.

Dazu werden Defizite benannt und Vorschläge für die Verbesserung der Situation gemacht.

**Defizit 1:** Missverhältnis zwischen der Bedeutung der Evolutionsbiologie und ihrem Stellenwert an Schulen und Hochschulen

**Empfehlung 1:** Detaillierte und quantitative Bestandsaufnahme der Situation der evolutionsbiologischen Ausbildung an deutschen Schulen und Hochschulen

In einem ersten Schritt sollte das Missverhältnis zwischen der wissenschaftlichen Bedeutung der Evolutionsbiologie und ihrer Relevanz in der Ausbildung umfassend untersucht werden. Hierfür wird eine detaillierte und quantitative Bestandsaufnahme der Situation der evolutionsbiologischen Ausbildung an Schulen und Hochschulen angeregt, die über die hier vorgelegte knappe qualitative Analyse hinausgeht. Eine solche umfassende Bestandsaufnahme soll die folgenden Fragen beantworten:

- Welche evolutionsbiologischen Inhalte sind für Studierende der Lebenswissenschaften bzw. Studierende eines Lehramts verbindlicher Prüfungsstoff?
- Wie ist der evolutionsbiologische Wissensstand von Schulabgängern in den unterschiedlichen Bildungsgängen des deutschen Schulsystems?

Die gewonnenen Daten sollen sowohl die Verstetigung und Intensivierung der bereits vorhandenen positiven Tendenzen als auch die koordinierte Planung neuer Initiativen für die Stärkung der Evolutionsbiologie an Schulen und Hochschulen unterstützen.<sup>82</sup>

<sup>82</sup> Instrumente zur Erfassung des fachwissenschaftlichen und des fachdidaktischen Wissensstandes bezüglich der Evolutionsbiologie liegen z.B. aus dem Projekt „Messung professioneller Kompetenzen in mathematischen und naturwissenschaftlichen Lehramtsstudiengängen“ (KiL; WGL; AZ: SAW-2011-IPN-2) am Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik vor.

**Defizit 2:** Gefahr einer Abschwächung vorhandener positiver Entwicklungen

**Empfehlung 2:** Einrichtung einer länderübergreifenden Koordinierungsgruppe

Die koordinierte Unterstützung einzelner Projekte, welche die Situation in der evolutionsbiologischen Lehre an deutschen Hochschulen und Schulen verbessern sollen, muss nicht bis zur umfassenden Erhebung empirischer Daten zur Situation warten. Dazu sollten Schlüsselakteure möglichst schnell und direkt in Verbesserungsmaßnahmen einbezogen und in ihren Vorschlägen unterstützt werden. Als Schlüsselakteure gelten diejenigen Fachwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler, Fachdidaktikerinnen und -didaktiker sowie Lehrkräfte, welche die bestehenden positiven Ansätze maßgeblich gestaltet haben. Diese Einbeziehung und Unterstützung kann durch die Einrichtung einer länderübergreifenden Koordinierungsgruppe geschehen, die durch fachwissenschaftlich-fachdidaktische Veranstaltungen sowohl das allgemeine Interesse an der Evolutionsbiologie in Schule und Hochschule langfristig wachhält als auch die bereits eingeleiteten Verbesserungen stärkt.

### 3.2 Die Evolutionsbiologie curricular und fachdidaktisch als integrativen Rahmen des Biologieunterrichts etablieren

Die Qualität des Schulunterrichts spielt sowohl bei der allgemeinen Vermittlung von evolutionsbiologischem Wissen als auch bei der Rekrutierung des Nachwuchses für die Lebenswissenschaften eine zentrale Rolle. Deshalb sind Maßnahmen zur Stärkung der Evolutionsbiologie im Schulunterricht von herausragender Bedeutung. Im Folgenden werden Verbesserungen im Curriculum des Biologie- bzw. naturwissenschaftlichen Unterrichts und in den Unterrichtsmaterialien vorgeschlagen.

**Defizit 3:** Fehlende curriculare Gesamtplanung für die schulische Vermittlung der Evolutionsbiologie

**Empfehlung 3:** Entwicklung eines bundesweiten, die einzelnen Klassenstufen überspannenden Rahmen-Curriculums „Evolutionsbiologie für alle Schulformen“

Strukturelle Veränderungen bei der schulischen Vermittlung der Evolutionsbiologie sollten deren inhaltliche und methodische Schwierigkeiten ernst nehmen, als dies bisher geschehen ist. Das Verständnis evolutionärer Zeiträume und dynamischer Mechanismen fordert sowohl Lehrkräften als auch Schülerinnen und Schülern ein hohes Maß an Veranschaulichungsfähigkeit ab, das besonderer Schulung bedarf. Zudem liegen bisher nur wenige belastbare Studien aus dem Bereich der Unterrichtsforschung zur Evolutionstheorie vor. Nachhaltige Umgestaltungen des evolutionsbiologischen Schulunterrichts bedürfen daher einer langfristigen Planung. Dem sollte durch die Entwicklung eines bundesweiten, alle Klassenstufen überspannenden Curriculums für alle Schulformen Rechnung getragen werden, das abstrakt-konzeptionelle Zusammenhänge mit anschaulichen Beispielen und Vorschlägen für Experimente sowie mit weiteren biologischen Arbeitsweisen im Unterricht verknüpft.

Ein solches Curriculum sollte von Fachwissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern, Fachdidaktikerinnen und -didaktikern sowie Lehrkräften gemeinsam erarbeitet werden mit dem Ziel, dass das Thema „Evolution“ nicht erst am Ende der Schulzeit seinen Platz findet, sondern durchgehende Leitlinie des gesamten Biologieunterrichts ab Klasse 5 ist und integrativ auch in anderen Schulfächern zu thematisieren ist. Dabei sollten bereits bekannte Sachverhalte über die verschiedenen Klassenstufen inhaltlich vertiefend auf einer höheren Ebene wieder aufgegriffen und komplexer reflektiert werden.

Eine Anbahnung evolutionsbiologischer Themen sollte bereits in der Primarstufe erfolgen. Die Curricula sollten sowohl eigenständige Lerneinheiten zu Evolutionsbiologie festschreiben als auch sicherstellen, dass evolutionsbiologische Aspekte grundsätzlich bei möglichst vielen biologischen Themenstellungen angemessen berücksichtigt werden. Durch diese Maßnahmen sollen wesentliche Aspekte der Evolutionsbiologie systematisch erfasst werden – von der Rekonstruktion der Geschichte des Lebens über das Verständnis natürlicher Selektion bis hin zur Erkenntnis dynamischer Zusammenhänge und Verbindungen zu anderen Disziplinen wie der Medizin und Mathematik. Darüber hinaus sollen die evolutionsbiologischen Inhalte im Unterricht verknüpft werden mit der Anwendung grundlegender biologischer Denk- und Arbeitsweisen. Nur so können Schülerinnen und Schüler ein Verständnis für die der Evolutionsbiologie zugrunde liegenden Theorien und Fakten entwickeln.

Ein Curriculum für den Unterricht zur Evolutionsbiologie sollte die folgenden Kernaussagen behandeln, die sich durch ihre Relevanz aus Sicht der Wissenschaft, der Gesellschaft bzw. der/des einzelnen Schülerin/Schülers begründen lassen. Sie zielen sowohl auf die wissenschaftliche Bildung der Schülerinnen und Schüler als auch auf ihr lebensweltliches Handeln:

### **1. Ohne Evolutionsbiologie keine wissenschaftliche Erklärung der Diversität des Lebens**

Die Evolutionsbiologie bildet den integrativen Rahmen des biologischen Wissens. Einzeller wie auch komplexere Pflanzen und Tiere – einschließlich des Menschen – sind evolutionären Mechanismen unterworfen. Bei der exemplarischen Vermittlung dieser Erkenntnisse sind die Ergebnisse traditioneller Disziplinen der Biologie wie der Paläontologie und der vergleichenden Morpho-

logie zusammen mit den Resultaten der Molekularbiologie und Genomforschung als Belege heranzuziehen.

## **2. Ohne ein Verständnis der Evolution kein fundiertes Verständnis von biologischer Komplexität**

Biologische Prozesse zeigen auch auf molekularer und zellulärer Ebene eine unerwartete Komplexität, die nur in Bezug auf den zugrunde liegenden evolutionären Kontext zu verstehen sind (z.B. die Rolle von Ribonukleinsäuren, RNAs, in der Proteinsynthese, die Komplexität von Signalkaskaden oder die Rolle von Transmittern in der Nervenleitung). Eine konsequente Berücksichtigung evolutionärer Prinzipien ist daher auch in der Molekular- und Zellbiologie nötig.

## **3. Ohne Evolutionsbiologie kein Verständnis der Beziehung von Mensch und Umwelt**

Unter ökologischem Aspekt ist die Evolution die Quelle der Vielfalt an aktuellen Lebensformen, deren Gestalt sich stetig verändert. Die innerartliche Vielfalt zusammen mit der Artenvielfalt und der Diversität an Ökosystemen (Biodiversität) ist die Voraussetzung für die Anpassungsfähigkeit von Organismen an sich verändernde Umwelten. Dabei sollten die Ergebnisse der Domestizierung, des Ackerbaus sowie der Pflanzen- und Tierzucht ebenso als Evolutionsfaktoren betrachtet werden wie die vom Menschen ausgehenden Veränderungen des globalen Ökosystems Erde. Damit wird die Grundlage für die Bildung einer nachhaltigen gesellschaftlichen Entwicklung geschaffen.

## **4. Ohne Evolutionsgenetik kein tieferes Verständnis für die Rolle des Zufalls und seiner Gesetze in biologischen Phänomenen**

Die Erkenntnisse der Populationsgenetik und der Neutralen Evolutionstheorie beruhen auf der mathematischen Analyse von Zufallsprozessen, die zu Gesetzmäßigkeiten führen, wie sie auch aus der Physik bekannt sind (z.B. Wär-

melehre, Diffusionsprozesse), und damit auch inhaltlich verbunden werden können. Nur in diesem Kontext sind natürliche Selektion, Anpassung und die Entstehung neuer Arten zu verstehen. Sie bilden auch die Grundlage für die Einordnung von Unterschieden zwischen Populationen und für die Gefahren von Inzucht.

## **5. Ohne Spieltheorie kein Verständnis für die Dynamik sozialer und ökonomischer Interaktionen und Kooperation**

Die Spieltheorie wurde parallel in der Ökonomie und der Evolutionstheorie entwickelt und bildet die Grundlage für die Analyse von Konfliktsituationen mit unterschiedlichen Interessen. Besondere Bekanntheit gewonnen haben das „Gefangenendilemma“ (siehe Abb. 8) sowie das „Falke-Taube-Spiel“ (Kap. 1.4.5). Auf dieser Basis werden Konsequenzen alternativer Strategien untersucht, die bestimmend für die Evolution von Verhaltensmustern und von ökonomischem Handeln sind. Besondere Bedeutung erhält die Spieltheorie für das Verständnis der Evolution von Kooperationsmechanismen und dem verantwortungsvollen Umgang mit gemeinsamen Ressourcen (oft als public goods bezeichnet), die unsere Gesellschaft prägen.

## **6. Ohne Evolutionsbiologie kein fundiertes Verständnis medizinischer Zusammenhänge**

Die Evolutionshistorie des Menschen ist entscheidend für das Verständnis sowohl genetischer wie auch zivilisatorischer Krankheiten. Zudem kann die Interaktion des menschlichen Organismus mit seinen mikrobiellen Begleitern, dem Mikrobiom, nur im Evolutionskontext verstanden werden. Auch Störungen dieser Interaktionen müssen in diesem Rahmen interpretiert werden (Stichwort „probiotische Nahrung“). Der Umgang des adaptiven Immunsystems mit Infektionen

und Parasiten, die Konsequenz für die Entstehung von Allergien, die evolutionäre Dynamik der Entstehung von Krebszellen sowie die Dynamik der Resistenzentstehung bei Mikroorganismen gegen Antibiotika sind allesamt exzellente Beispiele für kontinuierlich aktive Evolutionsprozesse mit besonderer medizinischer Bedeutung. Unter dem Stichwort „Evolutionäre Medizin“ finden diese Themen zunehmend auch Eingang in die medizinische Grundausbildung. Letztlich muss sich der Mensch auch der Frage stellen, was der medizinische Fortschritt für die eigene Evolution bedeutet.

Die Erarbeitung eines orientierenden Curriculums, in dem diese Kernaussagen strukturiert für den Schulunterricht aufbereitet werden, könnte eine wichtige Initialzündung für innovative Projekte an Schulen bilden. Auch den gegenwärtigen Bestrebungen der Fachdidaktikerinnen und -didaktiker, die Evolutionsbiologie bereits in der Primarstufe anzubahnen und in der Sekundarstufe als Leitfaden des Biologieunterrichts zu lehren, würde durch ein solches Curriculum entsprochen. Entsprechende Entwicklungen sollten durch koordinierte fachdidaktische Forschung begleitet werden.

**Defizit 4:** Verzögerte Umsetzung des fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Wissensstandes zur Evolutionsbiologie in den Schulen

**Empfehlung 4a:** Erarbeitung von Unterrichtsmaterialien jenseits traditioneller Schulbücher

Verbesserungen des Status der Evolutionsbiologie im Schulunterricht werden durch eine Umstrukturierung der fachdidaktischen Ausbildung, Änderungen der Curricula und neue Schulbücher nur langfristig erzielt. Ein realistischer Zeithorizont ist ungefähr bei 10 Jahren anzusetzen. Solche langfristigen Ziele sollen

durch die länderübergreifende Koordinationsgruppe verfolgt werden. Ihre Erreichung sollte jedoch mittels kurz- und mittelfristiger Aktivitäten vorbereitet und flankiert werden. Um die notwendigen Veränderungen bereits jetzt einleiten zu können, werden Maßnahmen vorgeschlagen, die durch Aktivierung der jetzigen Lehramtsstudierenden und Verbesserung der Lehrerfortbildung schneller zu positiven Wirkungen führen können. Dazu gehört insbesondere die Erarbeitung von Unterrichtsmaterialien jenseits von traditionellen Schulbüchern. Solche Materialien können fachdidaktische Modelle und Konzepte für die Vermittlung evolutionsbiologischen Wissens flexibel umsetzen sowie rasch auf neue lebens- und erziehungswissenschaftliche Entwicklungen reagieren. Sie können über Fachzeitschriften und Online-Portale schneller verbreitet werden als über Schulbücher und direkt einzelne Zielgruppen (Studierende, Referendarinnen und Referendare, Lehrkräfte, Studienseminarleiterinnen und -leiter) ansprechen. Zudem bilden sie die Grundlage für die längerfristige Überarbeitung der Lehrbücher.

**Empfehlung 4b:** Nutzung von außerschulischen Maßnahmen im Bereich der Lebenswissenschaften zur Verbesserung der evolutionsbiologischen Ausbildung

Neben dem formalen Schulunterricht gewinnen außerschulische Bildungsmaßnahmen („Enrichment“) gesellschaftlich und bildungspolitisch zunehmend an Bedeutung. Um der verzögerten schulischen Weiterentwicklung der evolutionsbiologischen Bildung nachfolgender Generationen zusätzlich entgegenzuwirken, sollten bereits existierende Lerngelegenheiten außerhalb der Schule ebenfalls gezielt für eine Förderung des Evolutionswissens genutzt werden. Hierfür kommen an Hochschulen und außeruniversitären Instituten bereits etablierte Schülerlabore ebenso in Frage wie naturhistorische Museen und naturkundliche Sammlungen.

### 3.3 Die Evolutionsbiologie als Grundlage der Lebenswissenschaften und als transdisziplinäres Forschungsprogramm an den Hochschulen stärken

Forschung und Lehre sind im deutschen Wissenschaftssystem eng miteinander verbunden. Eine fundierte und zeitgemäße Vermittlung der Evolutionsbiologie wird vor allem dort stattfinden, wo entsprechende Forschung zu finden ist. Eine Stärkung der Grundlagenrolle der Evolutionsbiologie in Lehre und Forschung sowie die interdisziplinäre Vernetzung der Evolutionsbiologie über Fakultätsgrenzen hinweg führt gleichzeitig auch zu einer Verbesserung der Ausbildung von Studierenden.

Die Lebenswissenschaften sind eine Leitdisziplin im Wissenschaftssystem und die Evolutionsbiologie ist das übergreifende Erklärungsprinzip in den Lebenswissenschaften. Die Allgemeingültigkeit ihrer Konzepte macht die Evolutionsbiologie zum Kern einer integrativen modernen Biologie. Das macht sie auch für viele Bereiche außerhalb der eigentlichen Evolutionsforschung bedeutsam, beispielsweise für die Medizin, die Landwirtschaft und die Fischerei oder die Verhaltens- und Sozialwissenschaften. Die theoretische Evolutionsbiologie schlägt auch eine Brücke zur Mathematik, Physik und Ökonomie. Moderne experimentelle Evolutionsbiologie beruht zudem stark auf genomischen und bioinformatischen Ansätzen, die inzwischen zu den Kernkompetenzen der Lebenswissenschaften zählen. In der Bioinformatik ist die Evolutionsbiologie die Grundlage für die Erarbeitung von Algorithmen zur Datenanalyse. Damit kann die Evolutionsbiologie zu einer interdisziplinären Vernetzung über klassische Instituts- oder Fakultätsgrenzen hinweg beitragen. An einigen Standorten übt sie diese Funktion bereits im Ansatz aus (z.B. in Kiel,

Köln und München). Eine Stärkung der Grundlagenrolle der Evolutionsbiologie in Lehre und Forschung kann damit zur nachhaltigen Stärkung eines Hochschulstandortes führen. An vielen deutschen Universitäten spielt die Evolutionsbiologie allerdings bisher nur eine Nebenrolle und kann daher nicht ausreichend integrativ wirken.

**Defizit 5:** Mangelnde Breite in der Etablierung evolutionsbiologischer Forschung an Hochschulen

**Empfehlung 5:** Flächendeckende Etablierung moderner evolutionsbiologischer Forschung und Lehre

In den letzten 10 Jahren haben sich, u.a. ausgehend von einer Initiative der VolkswagenStiftung, einige universitäre Schwerpunkte entwickelt. Diese zeigen, wie durch Kombination einer evolutionsbiologischen Fragestellung mit molekularbiologischer und mathematischer Vorgehensweise eine international anerkannte Grundlagenforschung etabliert werden kann. Diese Entwicklung sollte an den Fakultäten unterstützt werden, insbesondere mit dem Argument der transdisziplinären und integrativen Funktion evolutionsbiologischer Betrachtungsweisen.

Im Rahmen der Weiterentwicklung der Exzellenzinitiative und der damit zu konsolidierenden Schwerpunktbildung an Hochschulen sollte Konzepten zum Ausbau evolutionsbiologischer Forschung und Lehre eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Auch wenn nicht jede Universität einen eigenen evolutionsbiologischen Schwerpunkt benötigt, sollte die grundlegende Repräsentanz der Evolutionsbiologie in der Lehre durch mindestens eine einschlägige Berufung an jeder Universität angestrebt werden. Durch die Schwerpunkt-Entwicklungen der letzten Jahre steht dafür qualifizierter wissenschaftlicher Nachwuchs bereit.

**Defizit 6:** Ungenügende Nutzung des Potentials von evolutionsbiologischen Konzepten als transdisziplinärer Integrationsfaktor

**Empfehlung 6:** Förderung transdisziplinärer Ansätze

Eine nachhaltige Stärkung der Evolutionsbiologie als Forschungs- und Ausbildungsfeld an Hochschulen sollte insbesondere auch das transdisziplinäre Verständnis der Evolutionsbiologie als mathematisch modellierende und bereichsunabhängige allgemeine Wissenschaft verankern. Ansprechpartner sollten daher nicht nur in den Lebenswissenschaften, sondern auch in der Medizin, Physik, Mathematik und Ökonomie gefunden werden. Hindernisse auf dem Weg zum Ausbau einer so verstandenen evolutionsbiologischen Forschung und Lehre in Deutschland müssen – nicht zuletzt auch angesichts der zunehmenden Bedeutung von Techniken des mathematischen Modellierens in der Systembiologie und der Bioinformatik<sup>83</sup> – ausgeräumt werden. Im Falle der Evolutionsbiologie ist das Spektrum der Zusammenarbeit breit gefächert: Am einen Ende steht die klassische multidisziplinäre Zusammenarbeit, etwa zwischen Biologie und Medizin. Das andere Ende bildet die Evolutionsbiologie als generelle transdisziplinäre Disziplin, die mittels experimenteller, mathematischer Methoden sowie mittels Simulationen forscht und an keinen bestimmten Anwendungsbereich gebunden ist. Beispiele für Letzteres sind z.B. die evolutionäre Ökonomik, die Theorie der Kulturentwicklung, die evolutionäre Algorithmik und die mathematische Stochastik. Bemühungen, dazu passende (Master-)Studiengänge und Graduiertenschulen mit enger Anbindung an Forschungsschwerpunkte zu etablieren, sollten als begrüßenswerte Neuerungen angestrebt werden.

Auch die allgemeine wissenschaftliche Bildung würde durch die konsequente Nutzung der integrativen Funktion der Evolutionsbiologie für das wissenschaftliche Weltverständnis, also noch über die Lebenswissenschaften hinausreichend, wichtige neue Impulse erhalten: Es könnten Veranstaltungen für Studierende unterschiedlichster Fachrichtungen – von den Naturwissenschaften über die Sozial- und Verhaltenswissenschaften bis hin zur Mathematik und Informatik – eingerichtet werden.<sup>84</sup>

<sup>83</sup> Leopoldina (2014a).

<sup>84</sup> Entsprechende Vorlesungen und Seminare könnten von Bachelor- und Master-Studierenden als Pflicht- oder Wahlpflichtveranstaltungen in Modulen zu allgemeinen Qualifikationen oder fächerübergreifenden Themen belegt werden.

## Glossar

### **Anthropologie**

Wissenschaft vom Menschen.

### **Allel**

Variante eines bestimmten Gens.

### **Biodiversität**

Oberbegriff für die Vielfalt der Ökosysteme, Lebensgemeinschaften und Arten sowie für die genetische Vielfalt innerhalb einer Art.

### **Epigenetik**

Molekulare Mechanismen, die zu einem stärkeren oder schwächeren Auslesen von Genen führen, ohne dass die dort gespeicherte Information verändert wird.

### **Evolutionäre Psychologie**

Forschungszweig der Psychologie, der Erleben und Verhalten des Menschen mit Erkenntnissen über die Evolution zu erklären versucht.

### **Fitness**

Durchschnittliche Zahl an Nachkommen eines Individuums mit bestimmtem Genotyp im Verhältnis zur Zahl der Nachkommen eines anderen Individuums mit anderen Genotypen.

### **Genom**

Gesamtheit der Gene in einer Zelle oder einem Organismus.

### **Genotyp**

Kombination von elterlichen Allelen (Satz zweier Gene), die ein Organismus an einem bestimmten Genort hat.

### **Genpool**

Gesamtheit der Allele, die in einer Population zu finden sind.

### **Gen-Scheren**

Gen-Scheren (Restriktionsendonukleasen) wurden bereits vor 40 Jahren entdeckt. Erst mit der Entwicklung

neuer Techniken, z.B. der Zinkfinger-Nukleasen, TALENs (transcription activatorlike effector nucleases) und CRISPR-Cas9 (clustered regularly interspaced short palindromic repeats – CRISPR-associated proteins), ist es jedoch möglich, einzelne Abschnitte des Genoms anzu-steuern und Gene gezielt zu entfernen oder zu ersetzen.

### **Intelligent Design**

Siehe „Kreationismus und Intelligent Design“.

### **Kreationismus und Intelligent Design**

Von lat. *creare*: erschaffen; „das Dogma, wonach der gesamte Kosmos inklusive aller Lebewesen zumindest im Wesentlichen in seiner heutigen Form von einem Schöpfergott erschaffen wurde“; siehe Graf & Lammers (2011). Anhänger des Intelligent Design vermeiden religiöse Argumente. Sie rechnen die Erschaffung der Welt einem „intelligenten Designer“ zu.

### **Lebenswissenschaften**

Forschungsrichtungen und Ausbildungsgänge, die sich mit Prozessen oder Strukturen von Lebewesen beschäftigen oder an denen Lebewesen beteiligt sind. Außer der Biologie umfassen sie auch verwandte Bereiche wie Biodiversitätsforschung, Medizin, Biomedizin, Biochemie, Molekularbiologie, Biophysik, Bioinformatik, Humanbiologie, aber auch Agrartechnologie, Ernährungswissenschaften und Lebensmittelforschung.

### **Natürliche Selektion**

Der von Darwin und Wallace vorgeschlagene Mechanismus zur Erklärung der Anpassung von Organismen an die Umwelt und deren Evolution.

### **Makroevolution**

Evolutionsschritte mit größeren adaptiven Veränderungen, die über die Veränderungen einzelner Gene und deren Allele hinausgehen (im Gegensatz zu „Mikroevolution“).

### **Metabolom**

Gesamtheit der Stoffwechseleigenschaften eines Organismus.

### **Mikrobiom**

Gesamtheit der Mikroorganismen, die den Darm, die Haut oder andere Körperregionen des Menschen besiedeln (im Falle des Darms oft fälschlich als „Darmflora“ bezeichnet). Im Darm des Menschen leben mindestens 1 400 Bakterienarten und bilden dort ein eigenes Ökosystem (Mikrobiota). Ihre Art-Zusammensetzung ist sehr variabel und wird unter anderem von der Ernährung, der Immunkompetenz und von Medikamenten, aber auch von den Genen des Menschen beeinflusst.

### **Mikroevolution**

Evolutionäre Veränderungen der Häufigkeit von Allelen innerhalb einer Population. Dies kann durch adaptive oder neutrale Mechanismen erfolgen.

### **Molekulare Uhr**

Beobachtung, dass Gene sich oft mit einer relativ konstanten Rate an Mutationen verändern. Über die molekularen Unterschiede kann somit zurückgerechnet werden, wann sich ein gemeinsamer Vorfahre aufgespalten hat.

### **Morphologie**

Teilbereich der Biologie, der die Struktur und Form von Organismen erforscht.

### **Mutation**

Während der Zellteilung wird eine exakte Kopie des DNA-Stranges gebildet. Kommt es hierbei zu einem Fehler, spricht man von einer Mutation.

### **Paläontologie**

Wissenschaft von den Fossilien tierischen (Paläozoologie) oder pflanzlichen Ursprungs (Paläobotanik).

### **Pandemie**

Der Ausbruch einer Infektionskrankheit auf einer großen Skala (über Länder und Kontinente hinweg).

### **Phänotyp**

Eigenschaften bzw. Erscheinungsbild eines Organismus. Diese können auf den Genotyp oder Umwelteinflüsse zurückzuführen sein.

### **Plastizität**

Fähigkeit von Lebewesen, unter verschiedenen Umwelteinflüssen ihre morphologischen, physiologischen und ökologischen Eigenschaften individuell so zu modifizieren, dass sie den herrschenden Umweltbedingungen

angepasst sind. So kann beispielsweise eine genetisch identische Pflanze unter verschiedenen Umweltbedingungen verschiedene Wuchsformen haben.

### **Population**

Ein Gruppe von Organismen einer Art, die in einem genetischen Austausch stehen und damit einen gemeinsamen Genpool bilden.

### **Populationsgenetik**

Untersucht die Prozesse, welche die Häufigkeiten von Allelen beeinflussen (siehe Mikroevolution).

### **Proteom**

Gesamtheit aller Proteine, die von einer Zelle oder einem Lebewesen codiert werden.

### **Rekombination**

Neukombination von Genen während der Meiose. Durch Rekombination treten bei den Nachkommen im Vergleich zu den Eltern neu kombinierte Erbeigenschaften auf.

### **Resistenz**

Im Unterschied zur erworbenen Immunität die angeborene Widerstandsfähigkeit eines Organismus gegenüber schädlichen äußeren Einwirkungen, die z.B. durch eine Mutation entstanden sein kann. Die Resistenz beruht auf einer Selektion besser angepasster Organismen oder Zellen.

### **Stratigraphie**

Lehre von der Schichtabfolge und -korrelation in der Geologie.

### **Systembiologie**

Teil der Biologie, der versucht, zellbiologische Prozesse und Organismen in ihrer Gesamtheit besser zu verstehen und dabei u.a. Erkenntnisse zu den regulatorischen Prozessen des Genoms, des Proteoms, des Metaboloms und des Proteoms zusammenführt.

### **Taxonomie**

Wissenschaft von der Klassifizierung biologischer Arten auf der Basis ihrer natürlichen Verwandtschaftsbeziehungen.

## Methodik

### Anlass und Entstehung der Stellungnahme

Diese Stellungnahme wurde durch die Leopoldina-Mitglieder Prof. Dr. Thomas Börner, Prof. Dr. Rudolf Hagemann, Prof. Dr. Ingo Hansmann, Prof. Dr. Widmar Tanner, Prof. Dr. Diethard Tautz und Prof. Dr. Ulrich Wobus angeregt.

Um den faktischen Status der Evolutionsbiologie sowohl im Unterricht an Schulen als auch in der fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Lehre an Hochschulen qualitativ einschätzen zu können, wurden im Sommer 2011 Expertinnen und Experten der Evolutionsbiologie und ihrer Vermittlung interviewt. Dabei wurden vor allem solche Institutionen einbezogen, die sich in der evolutionsbiologischen Lehre sowohl im Bereich der fachwissenschaftlichen als auch fachdidaktischen Ausbildung durch eigene Projekte hervorgetan hatten und dementsprechend fundierte Auskünfte über die Situation der Evolutionsbiologie an deutschen Hochschulen geben konnten. Die Interviews behandelten folgende Leitfragen, die es den Gesprächspartnerinnen und -partnern erlauben sollten, ein fächerübergreifendes Bild der Rolle der Evolutionsbiologie in der universitären Ausbildung von zukünftigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Lehrenden zu zeichnen:

- Gegenwärtiger Stand  
„Wie sehen Sie die Situation der Evolutionsbiologie in der Ausbildung von Biologiestudentinnen und -studenten, Studierenden anderer Fächer sowie von Lehramtsstudierenden der Biolo-

gie und anderer Fächer an deutschen Hochschulen, ausgehend von Ihren lokalen Erfahrungen und Ihren Kontakten zu anderen Hochschulen?“

- Tendenzen in der jüngeren Vergangenheit  
„Können Sie eine signifikante Veränderung der Situation in den letzten Jahren feststellen (u.a. auch infolge des Darwin-Jahres)? Unterscheiden sich hierbei die fachwissenschaftliche und die fachdidaktische Ausbildung?“
- Maßnahmen für die Zukunft  
„Welche Verbesserungsmöglichkeiten sehen Sie? Inwiefern könnte die Leopoldina als Nationale Akademie der Wissenschaften hierbei eine fördernde Rolle spielen?“

Auf der Grundlage der Ergebnisse dieser Recherche wurde im Herbst 2011 ein erster Gesamtentwurf der Stellungnahme erarbeitet und von der Bildungskommission der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte kommentiert. Dieser Entwurf wurde in den darauffolgenden Sitzungen der Arbeitsgruppe diskutiert und durch die Sprecher der Arbeitsgruppe weiterentwickelt.

Eine Fassung von Mitte 2016 wurde durch nationale und internationale Experten (s.u.), die vorher nicht beteiligt waren, begutachtet. Auf der Basis der Empfehlungen dieser Gutachter wurde die Endfassung erstellt.

## Mitglieder der Arbeitsgruppe

### Sprecher der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Ute Harms	Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel
Prof. Dr. Diethard Tautz ML	Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie, Plön

### Mitglieder der Arbeitsgruppe

Prof. Dr. Dr. Gunnar Berg ML	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Dr. Matthias Bohn	Gesamtschule Melsungen
Prof. Dr. Dietrich v. Engelhardt ML	Universität Lübeck
Prof. Dr. Dittmar Graf	Justus-Liebig-Universität Gießen
Prof. Dr. Volker Loeschcke	Aarhus University
Prof. Dr. Dietrich Nies	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Jens Rolff	Freie Universität Berlin
Prof. Dr. Gerhard Schaefer	Ehemalige Bildungskommission der Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte (GDNÄ)
Prof. Dr. Ralph Tiedemann	Universität Potsdam

### Wissenschaftliche Referenten

Dr. Christian Anton	Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft
PD Dr. Stefan Artmann	Leopoldina, Abteilung Wissenschaft – Politik – Gesellschaft/ Präsidialbüro

### Folgende Personen haben in Form von Telefoninterviews an der Erstellung dieser Stellungnahme mitgewirkt:

Prof. Dr. Daniel Dreesmann	Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
Dr. Thomas D'Souza	Eberhard-Karls-Universität Tübingen
Dr. Alice Edler	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Dittmar Graf	Technische Universität Dortmund (bis 2012)
Dr. Henrike Hartmann	VolkswagenStiftung, Hannover
Prof. Dr. Uwe Hoßfeld	Friedrich-Schiller-Universität Jena
Prof. Dr. Ulrich Kattmann	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Prof. Dr. Klaus Reinhold	Universität Bielefeld
Prof. Dr. Werner Roos	Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Prof. Dr. Volker Storch	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
Prof. Dr. Ralph Tiedemann	Universität Potsdam
Prof. Dr. Eckart Voland	Justus-Liebig-Universität Gießen
Dr. Andreas Wessel	Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Prof. Dr. Klaudia Witte	Universität Siegen

**Folgende Personen haben Texte zu Unterkapiteln beigetragen oder diese kommentiert:**

Prof. Dr. Andreas Diekmann ML	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Prof. Dr. Detlev Ganten ML	Stiftung Charité
PD Dr. Helge Kampen	Friedrich-Loeffler-Institut, Riems
Prof. Dr. Ulrich Kattmann	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Prof. Dr. Siegfried Roth	Universität Köln
Cara Pries	Stiftung Charité
Prof. Dr. Ralf Sommer	Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Tübingen
Dr. Marten Winter	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung (iDiv), Halle-Jena-Leipzig

**Gutachter**

Prof. Dr. Dieter Ebert ML	Universität Basel
Prof. Dr. Harald Gropengießer	Leibniz-Universität Hannover
Prof. Dr. Marcus Hammann	Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Prof. Dr. Susanne Renner ML	Ludwig-Maximilians-Universität München
Prof. Dr. Hinrich von Schulenburg	Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Prof. Stephen C. Stearns, Ph.D.	Yale University, USA
Prof. Dr. Johannes Vogel	Museum für Naturkunde Berlin, Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung

Den Mitwirkenden in der Arbeitsgruppe, allen Gutachterinnen und Gutachtern und allen Personen, die durch Kommentare, Textbeiträge oder Interviews zur Verbesserung der Stellungnahme beigetragen haben, sei herzlich gedankt.

## Literatur

- Akademie der Wissenschaften in Hamburg & Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (2013) *Antibiotika-Forschung: Probleme und Perspektiven*. Berlin, Boston: DeGruyter.
- Archetti M (2009) Cooperation as a volunteer's dilemma and the strategy of conflict in public goods games. *Journal of Evolutionary Biology* 22: 2192–2200.
- Basanta D, Hatzikirou H & Deutsch A (2008) Studying the emergence of invasiveness in tumours using game theory. *European Physical Journal B* 63: 393–397.
- Basel N, Harms U & Prechtel H (2013) Analysis of students' arguments on evolutionary theory. *Journal of Biological Education* 47: 192–199.
- Bearhop S, Fiedler W, Furness RW, Votier SC, Waldron S, Newton J, Bowen GJ, Berthold P & Farnsworth K (2005) Assortative Mating as a mechanism for rapid evolution of a migratory Divide. *Science* 310: 502–504.
- Bild der Wissenschaft Plus (2009) Evolution! Die Sieger des Ideenwettbewerbs zum Darwin-Jahr. In: *Bild der Wissenschaft* 46(3), Supplement.
- Blount ZD, Borland CZ & Lenski RE (2008) Historical contingency and the evolution of a key innovation in an experimental population of *Escherichia coli*. *PNAS* 105: 7899–7906.
- Bosch TCG & Miller DJ (2016) *The Holobiont Imperative*. Berlin, Heidelberg, Dordrecht, New York: Springer.
- Bundesministerium für Gesundheit (2015) *DART – Deutsche Antibiotika-Resistenzstrategie*. Berlin. Link: [https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/Publikationen/Gesundheit/Sonstiges/Bericht\\_DART\\_Deutsche\\_Antibiotika-Resistenzstrategie.pdf](https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/Publikationen/Gesundheit/Sonstiges/Bericht_DART_Deutsche_Antibiotika-Resistenzstrategie.pdf) (Stand: 25.01.2017).
- Carroll SP, Jørgensen PS, Kinnison MT, Bergstrom CT, Denison RF, Gluckman P, Smith TB, Strauss SY & Tabashnik BE (2014) Applying evolutionary biology to address global challenges. *Science* 346: 1245993.
- Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (2016) Brief History of Antibiotics. Link: <https://www.cdc.gov/drugresistance/about.html> (Stand: 09.01.2017).
- Crespi B & Summers K (2005) Evolutionary biology of cancer. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 545–552.
- Crutzen PJ (2002) Geology of mankind. *Nature* 415: 23.
- Culotti E (2015) New life for old bones. *Science* 349: 358–361.
- Curry A (2013) The milk revolution. *Nature* 500: 20–22.
- Darwin C (1859) *On the origin of species*. London: John Murray.
- Darwin C (1871) *The descent of man, and selection in relation to sex*. London: John Murray.
- de Oliveira T, Pybus OG, Rambaut A, Salemi M, Cassol S, Ciccozzi M, Rezza G, Castelli Gattinara G, D'Arrigo R, Amicosante M, Perrin L, Colizzi V, Perno CF & Benghazi Study Group (2006). Molecular epidemiology: HIV-1 and HCV sequences from Libyan outbreak. *Nature* 444: 836–837.
- Desmond A & Moore J (2009) *Darwin's Sacred Cause: How a Hatred of Slavery Shaped Darwin's Views on Human Evolution*. New York: Houghton Mifflin Harcourt.
- Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V. (MNU) (2006) *Arbeiten mit den Bildungsstandards im Fach Biologie fachspezifisch und fachübergreifend, dimensioniert und niveauevoll: Empfehlungen für die Umsetzung der KMK-Standards Biologie S I*. In: MNU-Heft 2/2006, Einhefter.
- Dijk EM von & Kattmann U (2010) Evolution im Unterricht: Eine Studie über fachdidaktisches Wissen von Lehrerinnen und Lehrern. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 16: 7–21.
- Dreesmann D, Graf D & Witte K (Hrsg.) (2011) *Evolutionsbiologie: Moderne Themen für den Unterricht*. Heidelberg: Spektrum.
- Esvelt KM, Smidler AL, Catteruccia F & Church GM (2014) Concerning RNA-guided gene drives for the alteration of wild populations. *eLife*. Jul 17. e03401. doi:10.7554/eLife.03401.
- European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC) (2009) *The bacterial challenge: time to react*. Stockholm.
- Fischer L (2011) *Experimentelle Biologie: Evolution in Flaschen*. Link: <http://www.spektrum.de/news/evolution-in-flaschen/1063559> (Stand: 10.01.2017).

- Gagneux P, Wills C, Gerloff U, Tautz D, Morin PA, Boesch C, Fruth B, Hohmann G, Ryder OA & Woodruff DS (1999) Mitochondrial sequences show diverse evolutionary histories of African hominoids. *PNAS* 96: 5077–5082.
- Ganten D (2008) *Evolutionäre Medizin – Evolution der Medizin*. Göttingen: Wallstein-Verlag.
- Gantz VM, Jasinskiene N, Tatarenkova O, Fazekas A, Macias VM, Bier E & James AA (2015) Highly efficient Cas9-mediated gene drive for population modification of the malaria vector mosquito *Anopheles stephensi*. *PNAS* 112: 6736–6743.
- Gatenby RA (2009) A change of strategy in the war on cancer. *Nature* 459: 508–509.
- Gluckman PD, Hanson MA & Low FM (2011) The role of developmental plasticity and epigenetics in human health. *Birth Defects Research Part C: Embryo Today: Reviews* 93: 12–18.
- Goodrich JK, Davenport ER, Waters JL, Clark AG, Ley RE (2016) Cross-species comparisons of host genetic associations with the microbiome. *Science* 352: 532–535.
- Gould SJ (2004) *Illusion Fortschritt*. Frankfurt (Main): Fischer.
- Graf D (Hrsg.) (2011) *Evolutionsbiologie: Akzeptanz und Vermittlung im europäischen Vergleich*. Heidelberg: Springer.
- Graf D & Lammers C (2011) Evolution und Kreationismus in Europa. In: Graf (2011), 9–28.
- Graf D & Soran H (2011) Einstellung und Wissen von Lehramtsstudierenden zur Evolution: Ein Vergleich zwischen Deutschland und der Türkei. In: Graf (2011), 141–161.
- Gropengießer H, Harms U & Kattmann U (Hrsg.) (2013) *Fachdidaktik Biologie* (9. völlig überarb. Auflage). Köln: Aulis Deubner Verlag.
- Großschedl J, Harms U, Glowinski I & Waldmann M (2014a) Professionswissen angehender Biologielehrkräfte: Das KiL-Projekt. *MNU-Heft* 8/2014: 457–462.
- Großschedl J, Mahler D, Kleickmann T & Harms U (2014b) Content-related knowledge of biology teachers from secondary schools: Structure and learning opportunities. *International Journal of Science Education* 36(14): 2335–2366.
- Großschedl J, Harms U, Kleickmann T & Glowinski I (2015) Preservice biology teachers' professional knowledge: Structure and learning opportunities. *Journal of Science Teacher Education* 26(3): 291–318.
- Haak W, Lazaridis I, Patterson N, Rohland N, Mallick S, Llamas B, Brandt G, Nordenfelt S, Harney E, Stewardson K, Fu Q, Mittnik A, Banffy E, Economou C, Francken M, Friederich S, Garrido Pena R, Hallgren F, Khartanovich V, Khokhlov A, Kunst M, Kuznetsov P, Meller H, Mochalov O, Moiseyev V, Nicklisch N, Pichler SL, Risch R, Rojo Guerra MA, Roth C, Szecsenyi-Nagy A, Wahl J, Meyer M, Krause J, Brown D, Anthony D, Cooper A, Alt KW & Reich D (2015) Massive migration from the steppe was a source for Indo-European languages in Europe. *Nature* 522: 207–211.
- Hammann M & Asshoff R (2014) *Schülervorstellungen im Biologieunterricht. Ursachen für Lernschwierigkeiten*. Seelze: Klett Kallmeyer.
- Harms U, Mayer J, Hammann M, Bayrhuber H & Kattmann U (2004) Kerncurriculum und Standards für den Biologieunterricht in der gymnasialen Oberstufe. In: Tenorth HE (Hrsg.), *Biologie, Chemie, Physik, Geschichte, Politik. Expertisen – im Auftrag der KMK*. Weinheim: Beltz, 22–84.
- Heino M, Dieckmann U & Godø OR (2002) Reaction norm analysis of fisheries-induced adaptive change and the case of the Northeast Arctic cod. *ICES CM* 2002/Y: 14.
- Hollricher K (2009) *Evolutionsbiologie in die Gesellschaft tragen: Vier neue Ausbildungsgänge in Deutschland fokussieren die Evolutionsbiologie. Ein Blick nach München, Tübingen, Münster und Potsdam*. In: *Impulse für die Wissenschaft 2009, Aus der Arbeit der Volkswagenstiftung*, 73–77. Link: [https://www.volkswagenstiftung.de/uploads/media/impulse\\_2009\\_gesamt.pdf](https://www.volkswagenstiftung.de/uploads/media/impulse_2009_gesamt.pdf) (Stand: 25.01.2017).
- Höfheld U (2011) *Biologie und Politik: Die Herkunft des Menschen*. Erfurt: Landeszentrale für politische Bildung Thüringen.
- Institut für Demoskopie Allensbach (2009) *Weitläufig verwandt – Die Meisten glauben inzwischen an einen gemeinsamen Vorfahren von Mensch und Affe*. Allensbacher Berichte Nr. 5.
- Jørgensen C, Enberg K, Dunlop ES, Arlinghaus R, Boukal DS, Brander K, Ernande B, Gardmark A, Johnston F, Matsumura S, Pardoe H, Raab K, Silva A, Vainikka A, Dieckmann U, Heino M & Rijnsdorp AD (2007) Ecology: managing evolving fish stocks. *Science* 318: 1247–1248, incl. Supplementary information.
- Johannsen M & Krüger D (2005) *Schülervorstellungen zur Evolution: Eine quantitative Studie*. In: *Berichte des Instituts für Didaktik der Biologie* 14: 23–48.
- Kampen H (2016) *Aedes albopictus in Deutschland. Handlungsbedarf und -optionen im Umgang mit der Asiatischen Tigermücke*. Riems. Link: [https://www.fli.de/fileadmin/FLI/Publikationen/Handlungsempfehlung/Handlungsempfehlung\\_Aedes-albopictus\\_2016-04-19.pdf](https://www.fli.de/fileadmin/FLI/Publikationen/Handlungsempfehlung/Handlungsempfehlung_Aedes-albopictus_2016-04-19.pdf) (Stand: 22.11.2016).
- Kattmann U (1995) *Konzeption eines naturgeschichtlichen Biologieunterrichts: Wie Evolution Sinn macht*. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 1: 29–42.

- Kattmann U (2000) Evolution und Schöpfung. Unterricht Biologie Kompakt 333.
- Kattmann U (2003) Vom Blatt zum Planeten – Scientific Literacy und kumulatives Lernen im Biologieunterricht und darüber hinaus. In: Moschner B, Kiper H, Kattmann U (Hrsg.), PISA 2000 als Herausforderung: Perspektiven für Lehren und Lernen. Hohengehren, Baltmannsweiler: Schneider Verlag, 115–137.
- Kegel B (2016) Mensch und Mikrobiom: Mögen die Mikroben mit uns sein! In: Neue Zürcher Zeitung. 28.07.2016  
Link: <http://www.nzz.ch/feuilleton/zeitgeschehen/mensch-und-mikrobiom-moegen-die-mikroben-mit-uns-sein-ld.107915> (Stand: 22.11.2016)
- Kimura M (1983) The neutral theory of molecular evolution. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kleickmann T, Großsiedl J, Harms U, Heinze A, Herzog S, Hohenstein F & Zimmermann F (2014) Professionswissen von Lehramtsstudierenden der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fächer – Testentwicklung im Rahmen des Projekts KiL. Unterrichtswissenschaft 42(3): 280–288.
- Kouyos RD, Metcalf JE, Birger R, Klein EY, Abel zur Wiesch P, Ankomah P, Arinaminpathy N, Bogich TL, Bonhoeffer S, Brower C, Chi-Johnston G, Cohen T, Day T, Greenhouse B, Huijben S, Metlay J, Mideo N, Pollitt LC, Read AF, Smith DL, Standley C, Wale N & Grenfell B (2014) The path of least resistance: aggressive or moderate treatment? Proceedings of the Royal Society B 281: 20140566.
- Krause J & Pääbo S (2016) Genetic time travel. Genetics 203: 9–12.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2004) Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Biologie: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 01.12.1989 in der Fassung vom 05.02.2004. Link: [http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1989/1989\\_12\\_01-EPA-Biologie.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1989/1989_12_01-EPA-Biologie.pdf) (Stand: 10.01.2017).
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2005) Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10): Beschluss vom 16.12.2004. München und Neuwied: Luchterhand.
- Kultusministerkonferenz (KMK) (2010) Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.10.2008 i. d. F. vom 06.10.2016. Link: [http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2008/2008\\_10\\_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2008/2008_10_16-Fachprofile-Lehrerbildung.pdf) (Stand: 10.01.2017).
- Kupferschmidt K (2016) Resistance fighters – Evolutionary biologists are challenging old dogmas about the way antibiotics should be used. Science 352: 758–761.
- Langergraber KE, Prüfer K, Rowney C, Boesch C, Crockford C, Fawcett K, Inoue E, Inoue-Muruyama M, Mitani JC, Muller MN, Robbins MM, Schubert G, Stoinski TS, Viola B, Watts D, Wittig RM, Wrangham RW, Zuberbühler K, Pääbo S & Vigilant L (2012) Generation times in wild chimpanzees and gorillas suggest earlier divergence times in great ape and human evolution. PNAS 109: 15716–15721.
- Larson E (2007) Community factors in the development of antibiotic resistance. Annual Review of Public Health 28: 435–447.
- Leonardi M, Gerbault P, Thomas MG, Burger J (2011) The evolution of lactase persistence in Europe. A synthesis of archaeological and genetic evidence. International Dairy Journal 22: 88–97.
- Leopoldina (2014a) Zukunftsreport Wissenschaft. Lebenswissenschaften im Umbruch – Herausforderungen der Omics-Technologien für Deutschlands Infrastrukturen in Forschung und Lehre. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. Nationale Akademie der Wissenschaften. Halle (Saale). Link: [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2014\\_Zukunftsreport\\_Langfassung\\_web.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2014_Zukunftsreport_Langfassung_web.pdf) (Stand: 10.01.2017).
- Leopoldina (2014b) Herausforderungen und Chancen der integrativen Taxonomie für Forschung und Gesellschaft – Taxonomische Forschung im Zeitalter der OMICS-Technologien. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. Nationale Akademie der Wissenschaften. Halle (Saale). Link: [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2014\\_Stellungnahme\\_Taxonomie\\_LANG\\_final.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2014_Stellungnahme_Taxonomie_LANG_final.pdf) (Stand: 10.01.2017).
- Leopoldina, Deutsche Forschungsgemeinschaft, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (2015) Chancen und Grenzen des genome editing/The opportunities and limits of genome editing. Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. Nationale Akademie der Wissenschaften. Halle (Saale). Link: [https://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2015\\_3Akad\\_Stellungnahme\\_Genome\\_Editing.pdf](https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_3Akad_Stellungnahme_Genome_Editing.pdf) (Stand: 10.01.2017).
- Li JZ, Absher DM, Tang H, Southwick AM, Casto AM, Ramachandran S, Cann HM, Barsh GS, Feldman M, Cavalli-Sforza LL, Myers RM (2008) Worldwide human relationships inferred from genome-wide patterns of variation. Science 319: 1100–1104.
- Maynard Smith J & Price GR (1973) The Logic of Animal Conflict. Nature 246: 15–18.
- Mayr E (2000) Evolutionstheorie: Darwins Einfluss auf das moderne Weltbild. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. Link: <http://www.spektrum.de/magazin/darwins-einfluss-auf-das-moderne-weltbild/826771> (Stand: 14.11.2016)
- Moran EV, Alexander JM (2014) Evolutionary responses to global change: lessons from invasive species. Ecology Letters 17: 637–649.

- National Academy of Sciences USA (2016) *Gene Drives on the Horizon. Advancing Science, Navigating Uncertainty, and Aligning Research with Public Values*. Washington DC.
- National Research Council (2000) *The future role of pesticides in U.S. agriculture*. Washington DC: National Academies Press.
- Nesse RM, Bergstrom CT, Ellison PT, Flier JS, Gluckman P, Govindaraju DR, Niethammer D, Omenn GS, Perlman RL, Schwartz MD, Thomas MG, Stearns SC & Valle D (2010) Making evolutionary biology a basic science for medicine. *PNAS* 107: 1800–1807.
- Nesse RM & Williams GC (1996) *Why We Get Sick: The New Science of Darwinian Medicine*. New York: Vintage Books.
- Neubrand C, Borzikowsky C & Harms U (2016) Adaptive prompts for learning Evolution with worked examples – Highlighting the students between the “novices” and the “experts” in a classroom. *International Journal of Environmental & Science Education* 11: 6774–6795.
- Neubrand C & Harms U (2016) Tackling the difficulties in learning evolution: Effects of adaptive self-explanation prompts. *Journal of Biological Education*. dx.doi.org/10.1080/00219266.2016.1233129.
- Neukamm M (Hrsg.) (2009) *Evolution im Fadenkreuz des Kreationismus: Darwins religiöse Gegner und ihre Argumentation. Religion, Theologie und Naturwissenschaft*. Göttingen: Vandenhoeck und Rupprecht.
- Neumann J von & Morgenstern O (1944) *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Nowell P (1976) The Clonal Evolution of Tumor Cell Populations. *Science* 194: 23–28.
- Palumbi SR (2001) Humans as the world’s greatest evolutionary force. *Science* 293: 1786–1790.
- Pena-Miller R, Lähnemann D, Jansen G, Fuentes-Hernandez A, Rosenstiel P, Schulenburg H, & Beardmore R (2013) When the Most Potent Combination of Antibiotics Selects for the Greatest Bacterial Load: The Smile-Frown Transition. *PLOS Biology* 11: e1001540
- Plagemann A (2011). Maternal diabetes and perinatal programming. *Early human development* 87: 743–747.
- Resistance to Xenobiotics (REX)-Consortium (2013) Heterogeneity of selection and the evolution of resistance. *Trends in Ecology and Evolution* 28: 110–118.
- Richards RJ (2011) The German Reception of Darwin’s Theory, 1860–1945. In: Ruse M (Hrsg.), *The Darwin Encyclopedia*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Römhild R, Barbosa C, Beardmore RE, Jansen G & Schulenburg H (2015) Temporal variation in antibiotic environments slows down resistance evolution in pathogenic *Pseudomonas aeruginosa*. *Evolutionary Applications* 8: 945–955.
- Rolshausen G, Segelbacher G, Hobson KA & Schäfer HM (2009) Contemporary evolution of reproductive isolation and phenotypic divergence in sympatry along a migratory divide. *Current Biology* 19: 2097–2101.
- Rosengren KS, Brem SK, Evans EM & Sinatra GM (eds.) (2012) *Evolution Challenges*. Oxford: Oxford University Press.
- Sarrazin T (2010) *Deutschland schafft sich ab*. München: Deutsche Verlagsanstalt.
- Scaduto DI, Brown JM, Haaland WC, Zwickl DJ, Hillis DM & Metzker ML (2010). Source identification in two criminal cases using phylogenetic analysis of HIV-1 DNA sequences. *PNAS* 107: 21242–21247.
- Schaefer G (2002) *Allgemeinbildung durch Naturwissenschaften*. Denkschrift der GDNÄ-Bildungskommission. Bad Honnef.
- Schaffner F, Medlock JM & van Bortel W (2013) Public health significance of invasive mosquitoes in Europe. *Clinical Microbiology and Infection* 19: 685–692.
- Settele J, Scholes R, Betts R, Bunn S, Leadley P, Nepstad D, Overpeck JT & Taboada MA (2014) Terrestrial and inland water systems. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR & White LL (eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 271–359.
- Smith GJD, Vijaykrishna D, Bahl J, Samantha J, Lycett SJ, Michael Worobey M, Pybus OG, Ma SK, Cheung CL, Raghvani J, Samir Bhatt S, Peiris JSM, Guan Y & Rambaut A (2009) Origins and evolutionary genomics of the 2009 swine-origin H1N1 influenza A epidemic. *Nature* 459: 1122–1126.
- Stearns SC, Randolph M, Nesse RM, Govindaraju DR, Ellison PT (2010) Evolutionary perspectives on health and medicine. *PNAS* 107: 1691–1695.
- Stearns SC (2011) On Designing Courses in Evolutionary Medicine. *Evolution, Education and Outreach* 4: 589–594.
- Stearns SC (2012) Evolutionary medicine: its scope, interest and potential. *Proceedings of the Royal Society B* 279: 4305–4321.
- Thomas CD (2015) Rapid acceleration of plant speciation during the anthropocene. *Trends in Ecology and Evolution* 33: 448–455.
- Umweltbundesamt (2003) *Ökonomische Folgen der Ausbreitung von Neobiota*. TEXTE des Umweltbundesamtes Nr. 79/03. Berlin, Dessau.

Venn O, Turner I, Mathieson I, de Groot N, Bontrop R & McVean G (2014) Strong male bias drives germline mutation in chimpanzees. *Science* 344: 1272-1275.

Vilà M, Basnou C, Pyšek P, Josefsson M, Genovesi P, Gollasch S, Nentwig W, Olenin S, Roques A, Roy D, Hulme PE & DAISIE partners (2010) How well do we understand the impacts of alien species on ecosystem services? A pan-European cross-taxa assessment. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8: 135-144.

Voland E (2007) Wir erkennen uns als den anderen ähnlich: Die biologische Evolution der Freiheitsintuition. In: *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 55: 739-749.

Wade N (2014) *A troublesome inheritance*. London: Penguin Press.

Wang L, Valderramos SG, Wu A, Ouyang S, Li C, Brasil P, Bonaldo M, Coates T, Nielsen-Saines K, Jiang T, Aliyari R & Chen G (2016) From Mosquitos to Humans: Genetic Evolution of Zika Virus. *Cell, Host & Microbe* 19: 561-565.

Weiss T, Basel N, Harms U, Prechtel H & Rothgangel M (2016). Fächerübergreifende Kompetenzen im Unterricht: Argumentieren in den Fächern Biologie und Religion – ein Beispiel. In Harms U, Schroeter B & Klüh B (Hrsg.), *Entwicklung kompetenzorientierten Unterrichts in Zusammenarbeit von Forschung und Schulpraxis*. Münster: Waxmann, S. 205-224.

Williams GC & Nesse RM (1991) The Dawn of Darwinian Medicine. *The Quarterly Review of Biology* 66: 1-22.

Zabel J & Gropengießer H (2011) Learning progress in evolution theory: climbing a ladder or roaming a landscape? *Journal of Biological Education* 45: 143-149.

## Internetquellen

Online-Portal der MINT (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik)-Initiativen in Deutschland: <http://www.mintzukunftschaften.de/>

Studienführer-Datenbank des Verbandes Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBIO): <http://www.studienfuehrer-bio.de/>

Wikipedia-Linksammlung zu Personen und Begriffen in Tab. 1 & 2. Es wird meist auf englischsprachige Seiten verwiesen, da die deutschsprachigen oft noch in alten Konzepten und alter Begrifflichkeit befangen sind, was als Beleg für den Nachholbedarf in moderner Evolutionsbiologie im deutschsprachigen Bereich dienen kann.

Charles Darwin:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Darwin](https://de.wikipedia.org/wiki/Charles_Darwin)  
Ernst Haeckel:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst\\_Haeckel](https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Haeckel)  
Motoo Kimura:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Motoo\\_Kimura](https://en.wikipedia.org/wiki/Motoo_Kimura)  
Charles Lyell:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Lyell](https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Lyell)

John Maynard Smith:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Maynard\\_Smith](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Maynard_Smith)  
Alfred Wallace:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Alfred\\_Russel\\_Wallace](https://de.wikipedia.org/wiki/Alfred_Russel_Wallace)

Natürliche Selektion:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Natural\\_selection](https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_selection)  
Populationsgenetik:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Population\\_genetics](https://en.wikipedia.org/wiki/Population_genetics)  
Moderne Synthese:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Modern\\_synthesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Modern_synthesis)  
Art-Entstehung:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Speciation>  
Neutrale Evolution:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Neutral\\_theory\\_of\\_molecular\\_evolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutral_theory_of_molecular_evolution)  
Molekulare Uhr:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular\\_clock](https://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_clock)  
Verhaltensbiologie:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Ethology>  
Soziobiologie:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Sociobiology>  
Spieltheorie:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Game\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Game_theory)  
Evolutionäre Spieltheorie:  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Evolutionäre\\_Spieltheorie](https://de.wikipedia.org/wiki/Evolutionäre_Spieltheorie)  
Evolutionär stabile Strategien:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionarily\\_stable\\_strategy](https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionarily_stable_strategy)  
Evo-Devo:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary\\_developmental\\_biology](https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_developmental_biology)  
Plastizität:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Phenotypic\\_plasticity](https://en.wikipedia.org/wiki/Phenotypic_plasticity)  
Epigenetik:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Epigenetics>  
Evolutionäre Medizin:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary\\_medicine](https://en.wikipedia.org/wiki/Evolutionary_medicine)  
Mikrobiom:  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Microbiota>  
Soziokulturelle Evolution:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Sociocultural\\_evolution#-Neoevolutionism](https://en.wikipedia.org/wiki/Sociocultural_evolution#-Neoevolutionism)

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AIDS:</b>	Acquired Immune Deficiency Syndrome
<b>CDC:</b>	Centers for Disease Control and Prevention
<b>CRISPR-Cas9:</b>	clustered regularly interspaced short palindromic repeats – CRISPR-associated proteins
<b>DART:</b>	Deutsche Antibiotika-Resistenzstrategie
<b>DNA:</b>	Desoxyribonukleinsäure
<b>ECDC:</b>	European Centre for Disease Prevention and Control, Europäische Gesundheitsbehörde
<b>ESS:</b>	Evolutionär stabile Strategie
<b>EVEREST:</b>	Evolution and Ecology Research School Tübingen
<b>FML:</b>	Friedrich-Miescher-Labor
<b>GDNÄ:</b>	Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte
<b>iDiv:</b>	Deutsches Zentrum für integrative Biodiversitätsforschung
<b>IEB:</b>	Institut für Evolution und Biodiversität Westfälische Wilhelms-Universität Münster
<b>IMPRS:</b>	International Max-Planck Research School, internationale Graduiertenschule für Evolutionsbiologie
<b>IPN:</b>	Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik
<b>KiL:</b>	Messung professioneller Kompetenzen in mathematischen und naturwissenschaftlichen Lehramtsstudiengängen
<b>KMK:</b>	Kultusministerkonferenz
<b>Leopoldina:</b>	Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
<b>MINT:</b>	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
<b>MNU:</b>	Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V.
<b>MSc:</b>	Studienabschluss Master of Science
<b>PLOS:</b>	Public Library of Science
<b>PNAS:</b>	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America
<b>RAS:</b>	Renin-Angiotensin-System
<b>REX-Consortium:</b>	Resistance to Xenobiotics-Consortium
<b>RNA:</b>	Ribonukleinsäure
<b>SFB:</b>	Sonderforschungsbereich
<b>TALENs:</b>	transcription activatorlike effector nucleases
<b>VBIO:</b>	Verband Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland



## Ausgewählte Publikationen zur wissenschaftsbasierten Politikberatung

---

Tiefe Hirnstimulation in der Psychiatrie (2017)

---

Verbraucherpolitik für die Energiewende (2017)

---

Rohstoffe für die Energiewende (2017)

---

Zum Verhältnis von Medizin und Ökonomie im deutschen Gesundheitssystem (2016)

---

Wissenschaftliche und gesellschaftspolitische Bedeutung bevölkerungsweiter Längsschnittstudien (2016)

---

Mit Energieszenarien gut beraten – Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung (2015)

---

Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 (2015)

---

Zur Gesundheitsversorgung von Asylsuchenden (2015)

---

Chancen und Grenzen des genome editing (2015)

---

Medizinische Versorgung im Alter – Welche Evidenz brauchen wir? (2015)

---

Public Health in Deutschland: Strukturen, Entwicklungen und globale Herausforderungen (2015)

---

Perspektiven der Quantentechnologien (2015)

---

Transplantationsmedizin und Organallokation in Deutschland: Probleme und Perspektiven (2015)

---

Die Energiewende europäisch integrieren – Neue Gestaltungsmöglichkeiten für die gemeinsame Energie- und Klimapolitik (2015)

---

Palliativversorgung in Deutschland – Perspektiven für Praxis und Forschung (2015)

---

Individualisierte Medizin – Voraussetzungen und Konsequenzen (2014)

---

Akademien fordern Konsequenzen aus der Ebolavirus-Epidemie (2014)

---

Frühkindliche Sozialisation – Biologische, psychologische, linguistische, soziologische und ökonomische Perspektiven (2014)

**Alle Publikationen sind auf der Internetseite der Akademie als kostenfreies pdf-Dokument verfügbar.**

**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V.**  
**– Nationale Akademie der Wissenschaften –**

Jägerberg 1  
06108 Halle (Saale)  
Tel.: (0345) 472 39-600  
Fax: (0345) 472 39-919  
E-Mail: [leopoldina@leopoldina.org](mailto:leopoldina@leopoldina.org)

**Berliner Büro:**  
Reinhardtstraße 14  
10117 Berlin

Die Leopoldina ist eine der ältesten Wissenschaftsakademien der Welt. 1652 gegründet, ist sie der freien Wissenschaft zum Wohle der Menschen und der Gestaltung der Zukunft verpflichtet. Mit ihren rund 1500 Mitgliedern versammelt die Leopoldina hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und zahlreichen weiteren Ländern.

Als Nationale Akademie Deutschlands vertritt die Leopoldina seit 2008 die deutsche Wissenschaft in internationalen Gremien und nimmt zu wissenschaftlichen Grundlagen politischer und gesellschaftlicher Fragen unabhängig Stellung. In interdisziplinären Expertengruppen erarbeitet die Leopoldina, auch gemeinsam mit anderen deutschen, europäischen und internationalen Akademien, öffentliche Stellungnahmen zu aktuellen Themen. Die Leopoldina fördert die wissenschaftliche und öffentliche Diskussion, sie unterstützt wissenschaftlichen Nachwuchs, verleiht Auszeichnungen, führt Forschungsprojekte durch und setzt sich für die Wahrung der Menschenrechte verfolgter Wissenschaftler ein.