



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Neue Folge | Nummer 424

Natur – Wissenschaft – Gesellschaft
Rückblick und Ausblick nach zehn Jahren
Nationale Akademie der Wissenschaften

Herausgegeben von Jörg Hacker



**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2019**

Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart

NOVA ACTA LEOPOLDINA

Abhandlungen der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina

Herausgegeben von Jörg HACKER, Präsident der Akademie

NEUE FOLGE

NUMMER 424

Natur – Wissenschaft – Gesellschaft Rückblick und Ausblick nach zehn Jahren Nationale Akademie der Wissenschaften

Vorträge anlässlich der Jahresversammlung
am 21. und 22. September 2018 in Halle (Saale)

Herausgegeben von:

Jörg HACKER (Halle/Saale)
Präsident der Akademie



**Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina
Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale) 2019
Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart**

Redaktion: Dr. Michael KAASCH und Dr. Joachim KAASCH
Fotos von der Jahresversammlung „Natur – Wissenschaft – Gesellschaft. Rückblick und Ausblick nach zehn Jahren Nationale Akademie der Wissenschaften“:
Markus SCHOLZ für die Leopoldina – S. 33, 47, 63, 77, 105, 121, 137, 147, 167, 187.
Archiv ECKART – S. 9.

Titelbild: Markus SCHOLZ für die Leopoldina

Die Schriftenreihe Nova Acta Leopoldina erscheint bei der Wissenschaftlichen Verlagsgesellschaft Stuttgart, Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart, Bundesrepublik Deutschland.

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

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

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

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

© 2019 Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e. V. – Nationale Akademie der Wissenschaften
Postadresse: Jägerberg 1, 06108 Halle (Saale), Postfachadresse: 110543, 06019 Halle (Saale)
Hausadresse der Redaktion: Emil-Abderhalden-Straße 37, 06108 Halle (Saale)
Tel.: +49 3 45 4723 91 34, Fax: +49 3 45 4723 91 39
Herausgeber: Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Jörg HACKER, Präsident der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften
Printed in Germany 2019
Gesamtherstellung: stm|media GmbH + druckhaus köthen GmbH & Co. KG
ISBN: 978-3-8047-3992-5
ISSN: 0369-5034
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

Inhalt

HACKER, Jörg: Vorwort	7
ECKART, Wolfgang U.: Akademien im Spannungsfeld zwischen Nation und Pluralismus ...	9
STAUDINGER, Ursula M.: Demographisches Altern. Chancen und Herausforderungen einer Gesellschaft des längeren Lebens.	33
RÖSLER, Frank: Frühkindliche Sozialisation – Die Entwicklung kognitiver, sprachlicher und motivationaler Kompetenzen in Individuum und Gesellschaft.	47
FRITZ, Peter: „Wasser“ und das internationale Engagement der Wissenschaftsakademien ..	63
BIRNER, Regina: Ernährungssicherung und Landwirtschaft	77
FRIEDRICH, Bärbel: Biomasse als erneuerbarer Energieträger.	105
ERB, Tobias J.: Neue biosynthetische Ansätze zur Kraft- und Wertstoffgewinnung	121
BELLER, Jan-Niclas, und BELLER, Matthias: Künstliche Photosynthese – Status und Perspektiven	137
HAHN, Julia, und BECKER, Katja: Dimensionen der antimikrobiellen Resistenz.	147
RADBRUCH, Lukas: Palliativmedizin	167
LENGAUER, Thomas: Statistische Datenanalyse in der Zeit von <i>Big Data</i>	187

Anhang

Podiumsdiskussion

Natur – Naturverständnis – Gesellschaft

Einführungsbeiträge

FRIEDRICH, Bärbel: Naturverständnis in einer technisierten Gesellschaft	209
RÖSLER, Frank: Die Bedeutung der Psychologie für die Politikberatung	211
WINNACKER, Ernst-Ludwig: Natur als Herausforderung in einer modernen Gesellschaft. ...	215

Vorwort

Die Jahresversammlung 2018 der Leopoldina stand im Zeichen des zehnjährigen Jubiläums ihrer Ernennung zur Nationalen Akademie der Wissenschaften. Unter dem weitgefassen Titel „Natur – Wissenschaft – Gesellschaft“ blickten wir auf einige der zentralen Themenfelder unserer Arbeit zurück. Doch wir blickten zurück, um nach vorne zu schauen: Wohin werden sich die von uns untersuchten Forschungsgebiete und gesellschaftlichen Herausforderungen voraussichtlich weiterentwickeln? Wie können wir die Ergebnisse unserer wissenschaftsbasierten Beratung von Politik und Öffentlichkeit in diese Entwicklungen einbringen? Welche bisherigen Themen sollten wir weiterverfolgen, welche neuen Themen aufgreifen?

Bei der Diskussion dieser Fragen stellte sich heraus, dass die Leopoldina gut beraten ist, sich zukünftig noch intensiver mit den Beziehungen zwischen ihren Schwerpunktthemen auseinanderzusetzen. Wir müssen der Komplexität der Probleme unserer Gesellschaft mit Lösungsansätzen begegnen, welche die Wechselwirkungen zwischen ihnen ernstnehmen. Dabei sollten wir einer Einsicht folgen, die unserem Mitglied Albert EINSTEIN zugeschrieben wird; sie lautet: „Everything should be made as simple as possible, but no simpler.“

Der vorliegende Tagungsband enthält schriftliche Versionen einiger Vorträge, die auf der Jahresversammlung gehalten worden sind. Wir möchten allen an diesem Tagungsband beteiligten Personen unseren Dank aussprechen. Dies gilt vor allem den Rednern, die uns freundlicherweise schriftliche Fassungen ihrer Vorträge zur Verfügung gestellt haben. Darüber hinaus danken wir den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Geschäftsstelle der Leopoldina, die an diesem Tagungsband mitgearbeitet haben. Besonders erwähnen möchten wir Joachim und Michael KAASCH, welche die Erstellung des Tagungsbandes redaktionell betreut haben.

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

Akademien im Spannungsfeld zwischen Nation und Pluralismus

Wolfgang U. ECKART ML (Heidelberg)



Zusammenfassung

Spätestens in der Epoche des Imperialismus hat die moderne Wissenschaft der Aufklärung ihre unschuldige Vorstellung verloren, selbstlos, pluralistisch und allein der Wahrheit und dem Kampf gegen Unmündigkeit verpflichtet zu agieren. Seit dem späten 19. Jahrhundert ringen nationale Institutionen der Wissenschaften mit ihren Konkurrentinnen außerhalb der Grenzen. Dies gilt für die universitäre Forschung ebenso wie für die außer-universitäre und selbstverständlich auch für die nationalen Akademien. Drei für die Menschheitsgeschichte so fatale Weltkriege, zwei mörderisch blutige zwischen 1914 und 1945 und ein die globale Existenz der gesamten Menschheit bedrohender ‚kalter‘ Krieg von 1945 bis 1990 haben dies im 20. Jahrhundert belegt. Der Vortrag wird sich kritisch mit der Rolle der Wissenschaften und insbesondere der Rolle der Akademien im Spannungsfeld zwischen Krieg und Frieden, zwischen totalitärer Herrschaft und Demokratie auseinandersetzen. Dabei soll gezeigt werden, dass gerade in den nationalen Akademien immer auch Menschen gewirkt haben, die sich aktiv für Frieden und wissenschaftlichen Pluralismus in Freiheit eingesetzt haben.

Abstract

By the time of imperialism, modern Enlightenment science had betrayed its idea of acting selflessly, pluralistically and with sole commitment to the truth and struggle against immaturity. Since the late 19th century, national scientific institutions had been wrestling with their foreign competitors. This applied to university research, non-university research and, naturally, to national academies as well. Three world wars, deeply damaging to human history – two murderous wars between 1914 and 1945 and a ‘cold’ war from 1945 to 1990 that existentially threatened the entire human race – are proof of this in the 20th century. The lecture will critically examine the role of science, especially the role of academies, between the extremes of war and peace, totalitarian rule and democracy. It aims to show that totalitarian systems have always attempted to force scientific institutions to serve the nation to the detriment of plurality. At the same time, scientists have always worked in the national academies and have actively promoted peace as well as the freedom of scientific pluralism. This is particularly true after the Second World War, but also at the height of the Cold War. But vigilance is called for. Nationalist movements in Europe are once again threatening the economic and ideological freedom and plurality of science.

Die Forschungsfreiheit zählt im Zusammenhang mit der Wissenschaftsfreiheit und der Lehrfreiheit zu den bürgerlichen Grundrechten. In Deutschland wird die Freiheit der Wissenschaft, Forschung und Lehre gemäß Artikel 5, Abs. 3 Grundgesetz (GG) als Grundrecht geschützt. Der Wortlaut ist knapp und präzise: „Kunst und Wissenschaft, Forschung und Lehre sind frei. Die Freiheit der Lehre entbindet nicht von der Treue zur Verfassung.“ Zusammen mit Absatz 1 des gleichen Artikels, der die Meinungs- und Informationsfreiheit in Wort, Schrift und Bild ohne Zensur ebenso garantiert wie die Wissensschöpfung aus allen „allgemein zugänglichen Quellen“ gewährt das Grundgesetz der Bundesrepublik Deutschland jeder Bürgerin und jedem Bürger auf diese Weise ein Freiheitsmaß in Forschung, Wissensbildung, Information, Lehre und öffentlicher Rede, das in der Verfassungsgeschichte aller deutschen Staaten zuvor und auch der Deutschen Demokratischen Republik niemals auch nur annähernd vergleichbar liberal angestrebt oder erreicht wurde.

1. Wissenschaftsfreiheit in den Verfassungen

Die neuzeitlichen Vorstellungen von Wissenschafts- und Meinungsfreiheit und damit auch von Pluralität in den Wissenschaften fußen beide in der Aufklärung. Immanuel KANT (1724–1804) hatte bereits 1798 im „Streit der Fakultäten“ für die Philosophische Fakultät eine gegenüber der Medizinischen, Juristischen und Theologischen Fakultät besondere Unabhängigkeit vom Einfluss des Staats postuliert, die in einer Verpflichtung allein auf Wahrheit und Vernunft zu bestehen habe. Für die Ausbildung in den staatsnahen Fächern Medizin und Recht galt dies freilich aus naheliegenden Gründen ebenso wenig wie für die Theologie. Idealtypisch dispositiv, mit der Realität allerdings kaum deckungsgleich, galt dies sicher auch für Wilhelm von HUMBOLDT (1767–1835), der mit der Gründung der Berliner Universität eine rein wissenschaftliche Einrichtung frei von staatlichen Eingriffen erhoffte, während Georg Wilhelm Friedrich HEGEL (1770–1831) die wissenschaftliche Autonomie als einen durch den Staat zu gewährleistenden Freiraum begriff. In der Paulskirchenverfassung vom 28. April 1849 findet sich dann erstmals eine Bestimmung über die akademische Lehrfreiheit: „Die Wissenschaft und ihre Lehre sind frei.“¹ Aber, diese Verfassung trat ja niemals in Kraft. Eine erste Garantie der Meinungsfreiheit, Grundbedingung eines jeden pluralistischen Diskurses, findet sich 1789 in Artikel 11 der Erklärung der Menschen- und Bürgerrechte in Frankreich als „un des droits les plus précieux de l’Homme“ („eines der kostbarsten Rechte des Menschen“).² Eines der häufig zitierten Bonmots zu diesem heute in demokratisch verfassten Staaten so selbstverständlichen Grundrecht wird dabei VOLTAIRE (1694–1778) zugeschrieben, findet sich aber tatsächlich in dieser Formulierung nur in der Biographie von Evelyn Beatrice HALL (1868–1956) über VOLTAIRE,³ ist nirgendwo wirk-

1 Verfassung des Deutschen Reiches, in: RGBI v. 28. April 1849, Abschn. VI, Art. VI, § 152.

2 „La libre communication des pensées et des opinions est un des droits les plus précieux de l’homme: tout citoyen peut donc parler, écrire, imprimer librement, sauf à répondre de l’abus de cette liberté, dans les cas déterminés par la loi.“ [„Die freie Äußerung der Gedanken und Meinungen ist eines der kostbarsten Rechte des Menschen: Alle Bürger dürfen dementsprechend frei reden, schreiben und drucken, sie sind aber verantwortlich für den Missbrauch dieser Freiheit in den durch das Gesetz bestimmten Fällen.“ – Déclaration des Droits de l’Homme et du Citoyen, Assemblée nationale, 1789 (pp. 1–8) (zitiert nach: https://fr.wikisource.org/wiki/D%C3%A9claration_des_Droits_de_l%27Homme_et_du_Citoyen; Zugriff: 17. 1. 2019).

3 TALLENTYRE [= HALL] 1906, S. 199.

lich belegt, dürfte aber der Überzeugung des Philosophen entsprochen haben: „I disapprove of what you say, but I will defend to the death your right to say it.“ („Ich lehne ab, was Sie sagen, aber ich werde bis auf den Tod Ihr Recht verteidigen, es zu sagen.“)⁴

Vielleicht ist dieser kurze Ausflug in die Verfassungsgeschichte der Wissenschafts- und Meinungsfreiheit verzeihlich, zumal es ja in meinem Beitrag um das Spannungsfeld von „Nation und Pluralismus“ gehen soll. Wir werden indessen sehr schnell zu dieser Frage vordringen, wenn es darum geht, welchen Pluralismusbegriff wir vor dem Hintergrund des Grundgesetzes denn auf die Wissenschaft anwenden, bzw. wessen Anwendung wir aus der Position der Wissenschaften heraus überhaupt für legitim halten wollen.

2. Pluralismusstreit aktuell

In diesem Zusammenhang ist die scharfe Kritik des ehemaligen Präsidenten der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Günter STOCK (*1944), an einer „Demokratisierung der Wissenschaft“ bemerkenswert. „Es gebe sowohl in Deutschland als auch über EU-Gremien in Brüssel die Tendenz“, so wurde STOCK in der Online-Ausgabe der *TAZ* vom 4. Juli 2014⁵ zitiert, dass „Partikularinteressen bestimmter gesellschaftlicher Gruppen“ zunehmend die Forschung beeinflussten. Dabei bezog sich die *TAZ* auf eine Rede STOCKS anlässlich des Leibniztages seiner Akademie 2014, in der er sich namentlich die Reformbewegung der „transformativen Wissenschaft“ überaus kritisch vorgenommen habe. Nun, dass sich gerade die *TAZ* über solche Kritik höchst verwundert zeigte, überrascht nicht. Sind doch die Protagonisten einer „Transformativen Wissenschaft“⁶ vorwiegend im Umfeld der Grünen Bewegung und des BUND angesiedelt. Angesichts großer gesellschaftlicher Herausforderungen, so die Vertreter dieser neuen wissenschaftspolitischen Ausrichtung, sei eine Neubestimmung des Verhältnisses von Politik und Wissenschaft notwendig: „Staatlich finanzierte wissenschaftliche Einrichtungen und Universitäten müssten ihre Forschungsaktivitäten in demokratisch kontrollierter Weise umfassend auf die Bewältigung von *global challenges* wie der Energieversorgung, der Erderwärmung oder des demographischen Wandels und der Migration ausrichten.“ Dass Günter STOCK, damals nicht nur Präsident der Berlin-Brandenburgischen Akademie, sondern zugleich Vorsitzender der deutschen und der europäischen Wissenschaftsakademien, einen solchen Zugriff der Politik oder politisch orientierter gesellschaftlicher Gruppen auf die Wissenschaften vehement ablehnte, kann man fraglos nachvollziehen. Nicht nur die von ihm entworfene Dystopie macht dies klar. – Man stelle sich vor: „Gesellschaftlich relevante Gruppen halten Einzug in den Hauptausschuss der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), um dort – etwa im Rhythmus von Landtagswahlen – Forschungsziele zu definieren.“⁷ Auch die historische Perspektive war STOCK gewichtiges Argument. Habe Deutschland doch „im 20. Jahrhundert zweimal auf bittere Weise erfahren, was es bedeutet, wenn Forschung und Wissenschaft ausschließlich in den Dienst so genannter gesellschaftlicher Interessen gestellt werden“.⁸

4 Vgl. hierzu KINNEL 1943.

5 RONZHEIMER 2014.

6 Vgl. SCHNEIDEWIND und SINGER-BRODOWSKY 2013.

7 RONZHEIMER 2014.

8 Ebenda.

3. Theorienpluralismus

Mit Recht dürfen wir wohl davon ausgehen, dass Günter STOCK mit seiner vehementen Zurückweisung eines politisch motivierten Pluralismus, der ja nicht selten in politisch erwünschten Wissenschaftsdogmatismus mündet, den wissenschaftstheoretisch durch Paul FEYERABEND (1924–1994) begründeten *Theorienpluralismus* definitiv nicht gemeint hat.⁹ FEYERABEND verstand darunter eine Methodologie, die in der Wissenschaft zurecht eine Vielzahl theoretischer Alternativen gelten lassen will, und zwar nicht, um damit im Wirrwarr widersprechender Theorien zu enden, sondern im Gegenteil, um durch deren kritisch-vergleichende Prüfung die zur Lösung einer Fragestellung am besten geeignete Theorie zu ermitteln und so letztlich dem Erkenntnisgewinn zu dienen.¹⁰ Mit ähnlichen erkenntnistheoretischen Argumenten wie bei FEYERABEND kann neben Theorienpluralismus auch ein *Methodenpluralismus* gefordert werden. Beispiele hierfür sind Karl R. POPPERS (1902–1994) Methodenpluralismus (in seiner *Logik der Forschung* 1935 bzw. *The Logic of Scientific Discovery* 1959)¹¹ oder der Methodenanarchismus Paul FEYERABENDS (*Against Method* 1975 und *Science in a Free Society* 1976)¹². Im Grunde fußen sowohl POPPER als auch FEYERABEND mit ihren Vorschlägen auf der strikten Kritik des Schuldogmatismus des Vorsokratikers THALES VON MILET im 6. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung, der stattdessen gefordert habe, Wahrheit in der Naturerkenntnis durch kritische Erörterung unterschiedlichster Erklärungen zu ermitteln und nicht auf der Grundlage einer einzigen dogmatischen Lehre.¹³ Voraussetzung des Theorien- wie des Methodenpluralismus ist die Annahme, dass es in einer konkreten historischen Situation der Forschenden weder Letztbegründungen, noch letztgültige Widerlegungen gibt, weil sich Hintergrundwissen permanent verändern kann und damit auch Beobachtungshypothesen widerlegt, also falsifiziert, werden können. Theorienpluralismus und die Akzeptanz eines konsequenten Fallibilismus¹⁴ etwa des Soziologen Hans ALBERT (*1921) oder des Erkenntnistheoretikers Helmut F. SPINNER (*1937) sind demnach eng miteinander verbunden. Hierzu Hans ALBERT 1972:

„Der Fortschritt der Wissenschaft vollzieht sich durch Konstruktion und Kritik, wobei die Erfindung theoretischer Alternativen und die Erfindung und Herstellung brauchbarer experimenteller Situationen – bzw. die Suche nach relevanten Tatsachen – eine wichtige Rolle spielen. Zur Wissenschaftslehre des Kritizismus gehört also ein theoretischer Pluralismus, der ausdrücklich die positive Bedeutung von Alternativen für das Problemlösungsverhalten betont und darüber hinaus die Möglichkeit eines Erkenntnisfortschritts in kontra-intuitiver und in kontra-induktiver Richtung berücksichtigt.“¹⁵

Ähnlich hatte bereits 1917 Max WEBER (1864–1920) in seinem Plädoyer für möglichst divergente Positionen an den Hochschulen argumentiert. „Kathedern-Wertungen“ von Hochschullehrern seien allenfalls dann akzeptabel, falls an den Hochschulen die Bedingungen

9 Vgl. FEYERABEND 1965, 1981.

10 Vgl. hier SPINNER 1971. – Knappe, aber gute einführende Zusammenfassung „Theorienpluralismus“ unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Theorienpluralismus>; zitiert: 18. 1. 2019.

11 POPPER 1935, 1959.

12 FEYERABEND 1975, 1976, 1978.

13 POPPER 2005, S. 57 (hier nach Hinweis bei <https://de.wikipedia.org/wiki/Theorienpluralismus>; zitiert: 18. 1. 2019); zu THALES knapp einführend MANSFELD 1983.

14 Vgl. HETHERINGTON o. J. (<https://www.iep.utm.edu/fallibil/>; Zugriff: 18. 1. 2019).

15 ALBERT 1972, S. 199; vgl. auch WASCHKUHN 1999, S. 178.

eines Wissenschaftspluralismus verwirklicht seien. „Denn der radikale Zweifel ist der Vater der Erkenntnis.“¹⁶ Da freilich solche Verhältnisse gerade an den Universitäten praktisch nicht gegeben seien, hält WEBER die Katheder-Wertfreiheit für die einzig mögliche liberale hochschulpolitische Lösung. Es gibt vergleichbare Zweifel an den Möglichkeiten eines Theorie- und Methodenpluralismus durch das ganze 20. und frühe 21. Jahrhundert. Ich will hier und heute nicht in dieses Universitäts-Bashing einfallen, aber auch die jüngste Geschichte des politischen Eingriffs in die Programmatik universitärer Entwicklung, wie das Beispiel der Exzellenzinitiative zeigt, sind dem Theorie- und Methodenpluralismus nicht immer besonders förderlich gewesen. Denken Sie in diesem Zusammenhang nur an das Idealbild der Volluniversität, das es nach dem Auslaufen der staatlichen Exzellenzsteuerung so nicht mehr überall geben wird. Um hier nicht falsch verstanden zu werden: Nicht die Herausbildung universitärer Exzellenz ist das Problem, sondern die wenig transparenten Methoden, wie hier Exzellenz am rein monetären Anreiz gemessen wurde und wird, sind es. Auch die Weise, wie kurzfristiges staatliches, oft auch regionalökonomisch motiviertes Interesse die Herausbildung ganz bestimmter Wissenschaftsstrukturen einerseits erzwingt, andererseits aber in die Unabhängigkeit der Universitäten in Forschung und Lehre und existenzbedrohend in autonom und komplex herausgebildete Forschungsschwerpunkte eingreift, steht dem Theorien- und Methodenpluralismus nicht selten im Wege.

Es ist eine bizarre Paradoxie, dass im 20. Jahrhundert, das doch die wissenschaftshistorischen Idealbilder des Theorien- und Methodenpluralismus hervorgebracht hat, politisch-dogmatische Systeme gerade diese Idealbilder durch die Indienstnahme der Wissenschaften für ihre politischen Ziele nicht nur infrage gestellt, sondern auch zerschmettert haben, Gott sei Dank nicht nachhaltig, aber doch exemplarisch. So sehr, dass das Einfordern theoretischer und methodischer Vielfalt zur permanenten Aufgabe und die Existenz und der Grad solcher Pluralität zum Prüfstein wissenschaftlicher Freiheit geworden sind. Der Prozess der Nationenbildung im 19. Jahrhundert und hier beginnend mit der Epoche des europäischen Imperialismus hat sicher initial hierzu beigetragen. Nationale Konkurrenz in Institutionen der Wissenschaften und der internationale Wettlauf um bedeutsame Ergebnisse auf vielen Gebieten der Forschung, *the scramble for success*, etwa in der Bakteriologie, aber nicht nur dort, und die Instrumentalisierung solcher Erfolge in den Kontexten der jeweiligen auswärtigen Kulturpropaganda der Nationen – nicht zuletzt auch im kolonialen Kontext – belegen dies bereits im Vorfeld des Ersten Weltkriegs und mehr noch danach.¹⁷

Genau genommen benennt STOCK hier nur exemplarisch die Wissenschaften im Nationalsozialismus und in der DDR. Ganz so einfach liegen die Dinge allerdings auch in historischer Perspektive nicht. Der Einfluss des Staates auf die Wissenschaften war auch vor der NS-Diktatur in Deutschland fest verankert. Die Reichsverfassung vom 16. April 1871 sah Grundrechte überhaupt nicht vor. Man war auf die schnelle Bildung des Nationalstaates aus. Grundrechts- oder gar Wissenschaftsdebatten hätten hier viel zu lange aufgehalten. Von Meinungsfreiheit keine Rede. Zensur fand statt. Und wie unfrei etwa die Universitäten und Akademien waren, belegt nicht nur das Beispiel Preußens etwa durch den autokratisch-diktatorischen Zugriff des allmächtigen preußischen Kultus-Ministerialdirektors Friedrich ALTHOFF (1839–1908) auf alle Budget-, Personal- und Berufungsfragen „seiner“ Univer-

16 WEBER [1917] 1988, S. 496.

17 Vgl. hierzu VOM BRUCH 1982. Zum kolonialen Kontext exemplarisch am Beispiel der Medizin ECKART 1989, 1993, 1997.

sitäten von Königsberg bis Marburg.¹⁸ Sicher, es gab die scheinbar autonomen Wirkungsbereiche der mit einer Professur versehenen Mandarine an den deutschen Universitäten;¹⁹ aber ihr akademisches Habitat war doch ganz vom Nationalstaatsgedanken durchdrungen. Und auch dem Pluralismus in wissenschaftspolitischer Hinsicht waren enge Grenzen gesetzt, wenngleich sich hier Spielraum wahrnehmen ließ. Aber auch die politische Hinwendung der deutschen Nationalökonomie auf die soziale Frage bzw. auf aktuelle Themen der Sozial- und Wirtschafts- und Gesellschaftspolitik signalisierte tatsächlich doch keinen gesellschaftlichen Pluralismus an den Hochschulen und Akademien, sondern folgte mit ihren Hauptvertretern des Kathedersozialismus von Gustav VON SCHMOLLER (1838–1917) bis Werner SOMBART (1863–1941) weniger erkenntnistheoretischen Problemen oder gar Paradigmen, sondern allenfalls der Frage, ob ein politisches Glaubensbekenntnis fachökonomische Qualifikation ersetzen dürfe.²⁰ Außenpolitisch zeigt sich dasselbe Bild. In der Phase des Hochimperialismus seit dem späten 19. Jahrhundert ringen nationale Wissenschaftsinstitutionen mit ihren ausländischen Konkurrentinnen. Und die informelle Kulturpolitik des Auswärtigen Amtes²¹ verfolgt keineswegs pluralen Austausch und kommunikativen Ausgleich, wenn sie das deutsche Schul- und Hochschulwesen propagiert, sondern eben die kulturimperialistische Idee eines „Größeren Deutschland“.²² Nein, es gab noch kein internationales Hochschulranking, aber es gab Wissenschaftsspionage, die systematisch den Stand der Konkurrenzinstitutionen auskundschaftete, wie etwa im Bereich der Tropenmedizin. Und internationale Fachkonkurrenz, wie exemplarisch zwischen den Schulen von Louis PASTEUR (1822–1895) und Robert KOCH (1843–1910), folgte durchaus nationalistischen bis chauvinistischen Linien, ganz zu schweigen von der Rolle der Wissenschaftler im Deutschen Kolonialverein oder im Alldeutschen Verband.²³

Die Akademien unterschieden sich hier nicht wesentlich von den Universitäten, wenngleich man sich selbst, wie etwa an der Bayerischen Akademie der Wissenschaften noch am Vorabend des Ersten Weltkrieges im Gegensatz zu den Universitäten doch als „friedlicher Hort für [...] die ideale Einheit der Wissenschaft [...], als ein Mittel- und Sammelpunkt der gesamten Forschungsarbeit“ verstanden hatte. Die Ansichten änderten sich mit Kriegsbeginn im August 1914, der die Universitäten mehr entvölkerte als die Akademien, beide indessen auf „Früchte des Blutopfers“²⁴ hoffen ließ. Wissenschaft dient nun ganz

18 Vgl. hierzu VOM BROCKE 1991; darin ECKART 1991.

19 Vgl. hierzu die durch Fritz K. RINGER in den 1980er Jahren ausgelösten und im Grunde bis heute andauernden Diskurse über den Typus des deutschen Hochschullehrers vom späten 19. Jahrhundert bis zum Anbruch der NS-Diktatur (RINGER 1983).

20 Die Literatur, beginnend mit Heinrich Bernhard OPPENHEIMS *Der Katheder-Socialismus* (1872) über Fritz VÖLKERLINGS Dissertation *Der deutsche Kathedersozialismus* (1959), bis hin zu Wolfgang DRECHSLERS *Kathedersozialismus and the German Historical School* (2016) ist umfangreich. Im Zusammenhang mit der Sozialen Frage, in der er sich in ökonomisch-sozialpolitischer Perspektive besonders entfaltete, sei hier auf Rüdiger VOM BRUCHS *Bürgerliche Sozialreform im deutschen Kaiserreich* (1985) verwiesen, für Werner SOMBART besonders auf Werner KRAUSES Dissertation *Werner Sombarts Weg vom Kathedersozialismus zum Faschismus* (1962) sowie auf Friedrich LENGERS *Sozialwissenschaft um 1900: Studien zu Werner Sombart und einigen seiner Zeitgenossen* (2011).

21 Vgl. hierzu jüngst MAASS 2015.

22 Vgl. als Quelle die Zeitschrift: *Das Größere Deutschland*. Wochenschrift für Deutsche Welt- und Kolonialpolitik, 1.1914–5.1918, November.

23 Vgl. hierzu vor allem CHICKERING 1984.

24 Vgl. BERG 2018.

dem Staat im Krieg, wobei ihre Pluralität selbstredend zugunsten der Kriegsbedürfnisse erweitert, im Hinblick auf ihre dienende Rolle gegenüber dem Nationalstaat unter Verzicht auf die frühere Internationalität und generelle Weltoffenheit eingeschränkt ist. Krieg und Wissenschaft verschmelzen gar angesichts der Totalität des neuen Kontextes: „Nicht als ob die Wissenschaft in den Kämpfen unsrer Tage ausgeschaltet wäre! Im Gegenteil.“ – So der Historiker und Akademiepräsident Karl Theodor VON HEIGEL (1842–1915) in seiner Münchener Rede über „Krieg und Wissenschaft“ vom 14. November 1914:

„Die Wechselbeziehungen zwischen Wissenschaft und Wehrwesen sind so zahlreich und mannigfach, daß ich nur obenhin darauf verweisen kann. Der Krieg selbst ist in der Gegenwart ein wissenschaftliches Problem geworden. Die wissenschaftliche Befähigung der Heeresführung und der Intellekt der Truppen sind nicht minder wichtige Erfordernisse, als Mut und Kraft.“²⁵

4. Deutsche Todsünden

Aber man darf sich hier nicht täuschen lassen, denn gerade die Akademien des deutschsprachigen Raums blieben während des Ersten Weltkriegs *cum grano salis* Räume, in denen eher die destruktive Kraft der Kriege an den verschiedensten Fronten innerhalb und außerhalb Europas beklagt wurde, als dass man sich auch dort der Sogwirkung des völkisch-nationalistischen Manifests der 93 „An die Kulturwelt!“ vom Oktober 1914 – vor nunmehr fast genau 104 Jahren – angeschlossen hätte.²⁶ In den großen Akademien, zumindest der Länder, die nicht von deutschen Soldatenstiefeln zertrampelt worden waren, empfand man ähnlich, in der *American Academy of Arts and Sciences* etwa oder in der *Royal Society* in London, wie jüngste Studien zeigen, die aus dem Studienzentrum der Leopoldina in internationaler Kooperation hervorgegangen sind.²⁷ Gleichwohl: Wollte man die giftgetränkten Todsünden der deutschen Wissenschaftsgeschichte benennen, die getrieben von fanatisch-völkischer Verwirrung und imperialistisch-chauvinistischer Selbstüberschätzung Freiheit, Internationalismus und Pluralität in den Wissenschaften auf dem Richtklotz nationaler Hybris vernichtet haben, dann sind es eben das sogenannte „Manifest der 93“ im Oktober 1914, dass die internationale Isolierung deutscher Wissenschaft mindestens bis zum Eintritt in den Völkerbund 1926 zur Folge hatte, und das „Bekenntnis“ hunderter führender deutscher Wissenschaftler zu Adolf HITLER und dem neuen nationalsozialistischen Staat vom November 1933,²⁸ das mit dem erzwungenen Austritt aus dem Völkerbund und einer erneuten Isolation deutscher Wissenschaft einherging. Das Bekenntnis dieser Professoren, viele von ihnen Mitglieder der deutschen Akademien, „Mit Adolf Hitler für des deutschen Volkes Ehre, Freiheit und Recht“ (so der Titel der Festveranstaltung vom 11. November 1933 in der Leipziger Alberthalle) zu kämpfen, setzte Nationalismus und einen deutschnationalen, aber auch bereits faschistischen Ehrbegriff an die Stelle von Freiheit, Internationalismus und Pluralität. Typisch hierfür scheint mir ein Redeabschnitt des Chirurgen und Leopoldina-Mitglieds Ferdinand SAUERBRUCH (1875–1951) vom 11. November 1933:

25 Ebenda, S. 75.

26 Vgl. hierzu ECKART und GODEL 2016; darin ECKART 2016.

27 Vgl. hier BERG und THIEL 2018.

28 *Bekenntnis der Professoren* o. J. [1933].

„Getragen von der Weihe dieser Stunde, die nur ein Teil des großen nationalen Erlebens ist, das uns alle mitgerissen hat, wage ich es, hier vor ihnen ohne Programm zu sprechen. Der Einzelne ist nur ein Glied in der ehernen Kette, die unser Volk an seine Führung bindet. [...] Das Volk ist für sie, so wie sie für das Volk ist. Aber ein gewaltiges Bekenntnis der ganzen Nation zum Willen unseres Führers und seiner großen Aufgaben muß der Welt zeigen, daß Deutschland erwacht ist und sein Recht freier Selbstbestimmung zurückfordert zu wirklichem Frieden und neuem Aufbau.“²⁹

Auch der Berliner Arzt und Anthropologe Eugen FISCHER (1874–1967), ebenfalls Mitglied der Leopoldina, brachte den neuen völkischen Charakter der deutschen Wissenschaft, die nur noch dem „Führer“ folgen sollte, auf den Punkt:

„Das deutsche Volk hat sich ein neues Haus gebaut auf alter Väter Scholle. [...] Ein gewaltiger Baumeister hat den Riß gezeichnet und den Bau geleitet und es fertig gebracht durch die Macht und den Zauber seiner Persönlichkeit, ein ganzes 65-Millionen-Volk mitzureißen, mitzureißen zu einer gewaltigen Welle des Mitbauens [...]. Einen Nationalen Staat haben wir aufgerichtet, und wir sind dabei, ihn auszubauen, einen Staat aus Blut und Boden, einen Staat aus der deutschen Volksverbundenheit heraus aufgebaut auf Volkstum, Rasse und deutscher Seele. [...] Wir Wissenschaftler bauen mit, wir führen das deutsche Geistesleben mit, [...] mit vollem und ganzem Herzen dem neuen Staat folgend.“³⁰

Dass sich an akademischen Einrichtungen, die mit „eherner Kette“ an den neuen NS-Staat gebunden waren, oder auf der Grundlage von „Volkstum, Rasse und deutscher Seele“ kein pluralistisches Denken mehr würde entfalten können, liegt auf der Hand. – Vieles wäre in diesem Zusammenhang über die Indienstnahme der deutschen Universitäts-Wissenschaft, der deutschen Akademien, die sich lange widersetzen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft, des Reichsforschungsrates und der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft durch den nationalistischen NS-Staat zu sagen. Indes, dies ist heute nicht mein Thema.

5. Exkurs: Universitäre Interdisziplinarität und Pluralismus bei und um Karl Jaspers

Karl JASPERS (1883–1969) kam aus einer sich zunehmend naturwissenschaftlich deutenden Medizin und wechselte 1913 über in die Philosophie, ohne freilich sich je danach von seiner Herkunft wirklich abzuwenden, sondern fortan getragen von der tief empfundenen Notwendigkeit des Brückenschlags zwischen den Fakultäten und ihrer philosophischen Zusammenschau mit durchaus praktischen Konsequenzen denkend zu handeln. In der letzten, zusammen mit Kurt ROSSMANN (1909–1980) bearbeiteten Neufassung seiner *Idee der Universität*³¹ hat JASPERS 1961 über die Ganzheit dieser Institution so formuliert:

„Die Universität ist Forschungs- und Lehranstalt, Bildungswelt, kommunikatives Leben, der Kosmos der Wissenschaften *ineins*. Jede dieser Aufgaben wird um so kräftiger, sinnvoller, klarer als sie an den anderen Teil hat. In der Idee kann die eine Aufgabe von den anderen nicht gelöst werden, ohne dass die Substanz der Universität zerfällt und ohne dass zugleich jede Aufgabe für sich verkümmert oder hybride unheilvolle Formen annimmt. Alle Aufgaben sind Momente eines lebendigen Ganzen der Idee.“³²

²⁹ Ebenda, S. 21.

³⁰ Ebenda, S. 9.

³¹ JASPERS 1923; Neufassung 1946.

³² Vgl. JASPERS und ROSSMANN 1961, S. 65.

Es leuchtet in der aktuellen Situation unserer Zeit unmittelbar ein, das sich der bei JASPERS *idealiter* angestrebte universitäre „Kosmos der Wissenschaften“ nur im Rahmen einer Volluniversität entfalten kann. Jede kurzatmige Konzentrationsstrategie, die einer „Beschneidung“ der Universität „an den Rändern“ das Wort redet, erscheint vor diesem Hintergrund zynisch und kontraproduktiv. Universität kennt in ihrem Kosmos keine verzichtbaren „Ränder“, es sei denn sie vollzöge ohne Not ihre Selbstaufgabe durch solche „Beschneidung“. Gerade das Zusammenwirken naturwissenschaftlicher Großforschung mit den Geisteswissenschaften und hier besonders auch mit den kleinen Exzellenzfächern des Kosmos Universität sichert ihre Idee. Über die Notwendigkeit des unverzichtbaren Zusammenwirkens von Natur und Geisteswissenschaften hat sich JASPERS wenig später eben in seiner *Idee der Universität* geäußert. Beide, „Geisteswissenschaften und Naturwissenschaften“, so lesen wir in seinem Text von 1961, „haben die Tendenz, je sich selber den Vorrang zu geben und zur eigentlichen Wissenschaft zu machen“,³³ aber wer hier „nur die Ergebnisse kennt, hat ein im Grunde totes Wissen. [...] Es entsteht eine abergläubige Dogmatik der zur Autorität erhobenen Wissenschaft.“³⁴ Um dem Idealzustand der Universität, ihrem zusammenhängenden Kosmos näherzukommen, bedürfen wir sowohl des naturwissenschaftlichen „Realismus“, denn „unser Dasein ist bestimmt von diesem Unverstehbaren“³⁵ in der Natur, dem sich dieser erklärend zuwendet, als auch der Geisteswissenschaften in ihrem Mühen um die dem Geist verstehbaren Daseinsbedingungen des Menschlichen, der *conditio humana*. Als Ideal immer anzustreben, wohl aber niemals vollends erreichbar ist JASPERS ein „Bildungsideal, in dem [geisteswissenschaftlicher] Humanismus und [naturwissenschaftlicher] Realismus miteinander verbunden wären zu gegenseitiger Erleuchtung und Durchdringung“.³⁶ In diesem Sinne ist Naturwissenschaft immer auch Geisteswissenschaft und *vice versa*.³⁷ Disziplinäre Wissenschaftlichkeit allein, und möge sie noch so elaboriert und noch so fein gesponnen sein, ist nicht der Ursprung der Wahrheit. Hierauf hatte JASPERS bereits 1931 in seiner weit verbreiteten Schrift über die *Die geistige Situation der Zeit*³⁸ zu Recht abgehoben. Selbstverständlich ist JASPERS in die-

33 Ebenda, S. 81.

34 Ebenda, S. 82.

35 Ebenda, S. 81.

36 Ebenda, S. 81.

37 HUSSERL hat dies 1935 am Problembereich der Umweltforschung nochmals zu verdeutlichen gesucht: „Umwelt ist ein Begriff, der ausschließlich in der geistigen Sphäre seine Stelle hat. Daß wir in unserer jeweiligen Umwelt leben, der all unser Sorgen und Mühen gilt, das bezeichnet eine rein in der Geistigkeit sich abspielende Tatsache. Unsere Umwelt ist ein geistiges Gebilde in uns und unserem historischen Leben. Es liegt hier also kein Grund für den, der den Geist als Geist zum Thema macht, für sie eine andere als eine rein geistige Erklärung zu fordern. Und so gilt es überhaupt: umweltliche Natur als in sich Geistesfremdes anzusehen und demzufolge Geisteswissenschaft durch Naturwissenschaft unterbauen und so vermeintlich exakt machen zu wollen, ist ein Widersinn. Es wird offenbar auch ganz vergessen, daß Naturwissenschaft (wie alle Wissenschaft überhaupt) ein Titel ist für geistige Leistungen, nämlich die der zusammenarbeitenden Naturwissenschaftler; als das gehören sie wie alle geistigen Vorkommnisse doch mit zum Umkreis dessen, was geisteswissenschaftlich erklärt werden soll. Ist es nun nicht widersinnig und ein Zirkel, das historische Ereignis ‚Naturwissenschaft‘ naturwissenschaftlich erklären zu wollen, erklären durch Hereinziehung der Naturwissenschaft und ihrer Naturgesetze, die als geistige Leistung selbst zum Problem gehören?“ – Edmund HUSSERL *Die Krisis des europäischen Menschentums und die Philosophie*, hier zitiert nach der Internetedition in der Bibliotheca Augustana (http://www.fh-augsburg.de/~harsch/germanica/Chronologie/20Jh/Husserl/hus_kris.html); letzter Zugriff: 20. 12. 2006).

38 JASPERS 1931.

sem Zusammenhang auch die unauflösbare Verknüpfung von Forschung und Lehre an der Universität; reine Forschungsanstalten müssen hier unfruchtbar bleiben:

„Solche Forschungsanstalten sind in der Tat mit Erfolg verwirklicht worden. Aber im Grunde bleiben sie Ableger der Universität. Nicht nur, dass aller Nachwuchs ihnen von den Universitäten kommen muß, auch die Forschung als solche ist angewiesen auf den Zusammenhang mit dem Ganzen des Wissens. [...] Der Sinn und der schöpferische Fortgang der Forschung kann nur bewahrt werden, wenn sie im Ganzen des Erkennens ihre lebendigen Bezüge pflegt. [...] Daher ist das hohe und unaufgebbare Prinzip der Universität die Verbindung von Forschung und Lehre.“³⁹

Es liegt auf der Hand, dass der „Zusammenhang mit dem Ganzen des Wissens“, wie er hier von JASPERS für die Lehre fruchtbar gemacht werden soll, immer nur das Ergebnis einer interdisziplinären und methodenpluralistischen Forschung sein kann, für die einzig die Universität den geeigneten Raum bietet. Dabei waren die Voraussetzungen für ein solches Denken in der Welt der universitären Mandarine vor 1933 denkbar schlecht. Versprach doch die eigene Disziplin sichere Heimat, lockte als Garantin der jeweils methodisch abgesicherten Wissenschaftlichkeit, versprach sich als waffenklirrende Feste disziplinärer Unabhängigkeit, lockte als wehrhafte Trutzburg gegen impertinent bedrohliche Annäherungsversuche von außen, schmeichelte als geheimes Unterpfand für die Eigenständigkeit, Themenschwerpunkte, Forschungsprogramme und Methoden selbst festzulegen. Stetig verfeinert wurde die Suche nach der je eigenen Wahrheit, die es mit höchster Raffinesse zu vervollkommen galt. Gerade der Umstand, dass damit eigene Relevanzkriterien an die Stelle von extern vorgegebenen Aufgaben getreten waren, wurde als Inbegriff erkämpfter wissenschaftlicher Unabhängigkeit gedeutet und normativ als disziplinäre „Freiheit der Wissenschaft“ bündisch gepflegt. Von Interdisziplinarität oder Pluralismus gar konnte keine Rede sein. Jeden Grenzbrecher von Außen traf der vernichtende Bannstrahl der inneren *Scientific Community*, während jeder disziplinäre Eskapismus von Innen nicht als fruchtbare Neugierde, sondern als methodische Selbstbefleckung und Absinken in den vernichtenden Sumpf des Dilettantismus gebrandmarkt wurde. Nicht grundlos hatte bereits im verhängnisbergenden Morgennebel des jungen 20. Jahrhunderts der Philosoph Edmund HUSSERL (1859–1938) den Verdacht geäußert, dass eine so auf sich selbst geworfene Wissenschaft – noch dazu fixiert auf die ebenso unbegründete wie obsessive Wahrnehmung einer unabwendbaren Dichotomie zwischen Geistes- und Naturwissenschaft – letztlich die konkrete Lebenswelt verfehlen und an den wirklichen Problemen der Menschen wohl vorbei abstrahieren und idealisieren müsse.⁴⁰

Lassen Sie uns ehrlich sein: Manch kräftiger Strich dieser polemischen Überzeichnung kommt uns noch heute recht bekannt vor; und doch sehen wir inzwischen klar, wohinein gerade diese weltblind-selbstverordnete, autistisch-selbstbezügliche und selbstbetrügerisch gesellschaftsferne disziplinäre Isolation wenig mehr als 33 Jahre nach dem Jahrhundertbeginn unter den Zeichen der Diktatur bald hatte münden müssen, in den abrupten Verlust jeglicher akademischer Freiheit, unter das Joch der ideologischen Überformung, in den erzwungenen Gleichschritt staatlich erzwungener „Gemeinschaftsarbeit“⁴¹

39 Ebenda, S. 68.

40 Vgl. hierzu BECHMANN 1999.

41 Etwa in der Projektförderung der Deutschen Forschungsgemeinschaft bzw. des Reichsforschungsrates unter der nationalsozialistischen Diktatur.

und schließlich in die Lähmung und Vernichtung freier Wissenschaft durch ihre Nationalisierung. Es ist dies gerade in Heidelberg etwa durch den Versuch des Physikers und Nobelpreisträgers Philipp LENARD (1862–1947), eine „deutsche Physik“ zu kreieren, oder durch das Auswechseln der Inschrift „Dem lebendigen Geist“ über dem Portal zur Heidelberger Neuen Universität durch das chauvinistische Motto „Dem deutschen Geist“ während der nationalsozialistischen Diktatur eindrücklich demonstriert worden.

Die Katastrophe des staatlichen Untergangs 1945 barg indes auch die Chance der wissenschaftskooperativen Neugestaltung. In der Nachkriegszeit tauchte der zunächst im Englischen eingeführte wissenschaftstheoretische Begriff „interdisziplinär“ Anfang der 1960er Jahre auch in der deutschen Diskussion um die Neuorganisation wissenschaftlicher Forschung auf. Er hat seither ältere Begriffe, wie etwa den unter der NS-Diktatur geprägten Ausdruck „Gemeinschaftsarbeiten“ [etwa die DFG-geförderte Krebsforschung zwischen 1933 und 1945] oder den in den 1950er Jahren gebräuchlichen Ausdruck „Gruppenforschung“ oder auch den sich seit eben dieser Zeit unter dem Eindruck zunehmender Westorientierung und einer entsprechenden Tendenz zur anglizistischen Sprachgestaltung zum Schlagwort gewordenen Neologismus „Teamarbeit“ weitgehend ersetzt, verfolgt aber prinzipiell vergleichbare Intentionen. Mit den Denkschriften Helmut SCHELSKYS (1912–1984), des wohl bis zum Beginn der Studentenbewegung einflussreichsten deutschen Nachkriegssoziologen, zur Gründung einer ostwestfälischen Universität in Bielefeld (1965) wurde die Rede von „interdisziplinärer Forschung“ zum festen Bestandsstück, ja nachgerade zum Programm offizieller universitär- und wissenschaftspolitischer Verlautbarungen.⁴² Das Auftauchen des Begriffs „interdisziplinär“ signalisierte zunächst lediglich ein Forschungs- und zumindest in der Anfangsphase noch keineswegs lehrorganisatorisches Postulat. Die Folie dieser Forderung ergab sich nahezu zwingend aus der begründeten Wahrnehmung, dass die klassischen Strukturen des größtenteils an die Universität gebundenen europäischen Forschungswesens angesichts wachsender Komplexität gesellschaftlicher, staatlicher und wirtschaftlicher Probleme die traditionellen Formen der Gruppenforschung zu überfordern begannen.

Der sich hieraus ergebenden neuen Aufgabenstellung folgt das Prinzip der Interdisziplinarität in unserer Zeit, wobei wir uns in der Neuorientierung auf dieses Forschungs-, Lehr- und Lernprinzip keineswegs unreflektiert dem radikalen Diktum Karl POPPERS im Kontext seines kritischen Rationalismus anschließen müssen, uns aber gleichwohl vom Charme seines innovativen Denkanstoßes einfangen lassen dürfen. Karl POPPER hatte bereits in seinen *Vermutungen und Widerlegungen* (1953) und noch einmal nachdrücklich in seinem Spätwerk (*Alles Leben ist Problemlösen*, 1994) vehement konstatiert:

„Wir studieren ... nicht Fächer, sondern Probleme. [...] Probleme [nämlich] können weit über die Grenzen eines bestimmten Gegenstandsbereichs oder einer bestimmten Disziplin hinausgreifen. [...] Es gibt [für POPPER] keine Gegenstandsbereiche; keine Lern- oder, vielmehr, Forschungsfächer: es gibt nur Probleme und die Bestrebung, sie zu lösen.“⁴³

42 Vgl. zu Interdisziplinarität HOLZEY 1976, hier Sp. 477.

43 POPPER 1994, S. 97; POPPER 1999, S. 84.

Es sind demnach nicht die Probleme, die sich an den Disziplinen orientieren müssen, es sind vielmehr die Disziplinen, die sich den Problemen zu unterwerfen haben. Doch dieses Umdenken muss [immer] erst vollzogen werden. Der Weg ist hier das Ziel, an dessen Ende vielleicht im Erfolgsfall die Lösung eines Problems liegt.⁴⁴ Im Sinne dieses Programms müssen wir heute Interdisziplinarität, aber auch Theorie- und Methodenpluralismus schlechthin und im Besonderen in der problemlösenden Kooperation zwischen den Geistes- und Naturwissenschaften verstehen. Wenn wir dies tun, dann lässt sich die allgemeine Methodik des interdisziplinären Lehrens und Forschens durch die folgenden Elemente charakterisieren. Wir benötigen (a) ein in der Lehre reflektierbares Forschungsproblem, dessen einzelne Problemaspekte über den Rahmen einer Disziplin hinausgehen, (b) eine Gruppe von Wissenschaftlern, deren Methoden- und Wissenshorizont verschiedenen Disziplinen zugeordnet sind und die sich im Bezug auf das Forschungsproblem und seinen Lehrgegenstand komplementär ergänzen, (c) nicht die Wissensaddition der Disziplinen, sondern eine Interaktion der verschiedenen Wissenschaftler – das anzustrebende Ganze ist hier mehr als die Summe seiner Teile –, und (d) ein im interdisziplinären Forschungs- und Lehrdiskurs angestrebtes Ergebnis, dessen Wert über der Summe disziplinärer Teilergebnisse liegt.⁴⁵ Wenn wir so problembezogen forschen und lehren, dann sind wir interdisziplinär in der Lehre, interaktiv in der Unterrichtsmethode und, gelegentlich durch die Not der lokalen Begrenztheit unseres Vorhabens gedrungen, auch international im Curriculum. Interdisziplinarität auf diese Weise betrieben, markiert nicht die Stunde der Scharlatane, sondern den Beginn der gemeinsamen Problemlösung. Sie ist ein wesentlicher Aspekt moderner problemlösungsorientierter Forschung.

Erfolgreiche, problembezogene interdisziplinäre Arbeit im Binnenraum der Universitäten und der Akademien, und auch dies muss hier nochmals betont werden, drängt aus der Universität in die reale Lebenswelt der Gesellschaft. Sie muss daher zur Transdisziplinarität werden, oder sie beraubt sich selbst ihrer konstitutiven Sinngebung. Transdisziplinarität meint das Überschreiten der Grenzen des Wissenschaftssystems im wissenschaftlichen Prozess der Bearbeitung einer Frage- und Problemstellung. Wie oft wird die Erfahrung gemacht, dass Wissenschaftler an der Praxis vorbeireden, dass andererseits Praktikerinnen und Praktiker in Politik, Wirtschaft, Verwaltung oder in Schulen wissenschaftliche Erkenntnisse nicht aufnehmen und nachhaltig umsetzen. Die Zusammenarbeit von Wissenschaftlern mit Praktikern schon bei der Formulierung des Problems, aber auch in dessen Bearbeitung kann zu adäquateren Problemlösungen und zu einer qualifizierteren Praxis führen. Die Wissenschaft sieht sich hier in Forschung und Lehre mit einem Problem konfrontiert, das der Physiker Alvin WEINBERG (1915–2006)⁴⁶ zu Beginn der 1970er Jahre auf klassische Weise so beschrieben hat: „Questions which can be asked of science and yet which cannot be answered by science.“⁴⁷ Er nannte solche Fragen transszientifisch und wollte sie eigentlich aus der Wissenschaft verbannen. Aber sie sind wie das unbewältigt Verdrängte zurückgekehrt und machen heute schon einen Teil der Forschung und Lehre aus.

44 Vgl. hierzu FISCHER 2005.

45 STECK 1979, S. 92.

46 Vgl. hierzu WEINBERG 1969 (dt. 1970).

47 Zitiert nach BECHMANN 1999.

6. Kalter Krieg DDR/BRD

In den kommenden Jahren wollen wir uns im Studienzentrum der Leopoldina mit der Rolle der Wissenschaften und besonders auch der Akademien in der Epoche des Kalten Krieges beschäftigen. Und ich bitte Sie, mir vor diesem Hintergrund im zweiten Teil meines Vortrags einen Blick in die Zeit nach 1945 zu gestatten, in der Pluralismus, Internationalität und Wissenschaftsfreiheit trotz der bitteren Erfahrungen zweier Weltkriege wiederum in Bedrängnis gerieten. Wir sind in Halle und damit in einer der großen Universitätsstädte der ehemaligen DDR, zusammen mit der westdeutschen BRD Frontstaat des Kalten Krieges. Hinsichtlich der Wissenschaftsfreiheit und des theoretischen, methodischen und internationalistischen Pluralismus waren die Verfassungsdispositive der beiden deutschen Staaten recht unterschiedlich, womit ich kurz auf meinen verfassungshistorischen Diskurs vom Beginn zurückkomme. Radikale Wissenschaftsfreiheit im Westen stand hier einer bedingten Wissenschaftsfreiheit im Osten gegenüber. In beiden Ländern offerierte die Verfassungswirklichkeit von den Dispositiven durchaus abweichende Realitäten. Denken sie etwa an den Komplex der politisch motivierten Berufsverbote für Akademiker in der Bundesrepublik oder an die erkämpften oder geduldeten Freiräume in der Wissenschaftsentfaltung in der DDR.

Die Frage nach den Freiheitsspielräumen von wissenschaftlicher Forschung und Lehre in der sowjetisch-besetzten Zone und in der Deutschen Demokratischen Republik, an deren Universitäten, in der Akademie der Wissenschaften oder an der Leopoldina, ist allerdings keineswegs so leicht und so eindeutig zu beantworten, wie es scheint. Ich denke, hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf. Wählt man – und darauf muss ich mich hier in aller Kürze beschränken – die Verfassungsgeschichte der DDR, dann allerdings ergibt sich ein klares Bild zumindest der Dispositive von Freiheit in Wissenschaft und Lehre. So sah der erste Verfassungsentwurf der SED vom 14. November 1946 für die zukünftige DDR in Artikel 11 noch eine scheinbar klare Grundrechtsqualität vor: „Die Kunst, die Wissenschaft und ihre Lehre sind frei.“ Skeptisch stimmt dann allerdings schon der Nachsatz: „Die Republik nimmt sich ihrer Pflege an und schützt sie vor allem Mißbrauch.“ Was oder besser, wer ist die Republik? Was heißt „Pflege“, was „vor allem Missbrauch“? Immerhin, der Entwurf fand endlich STALINS (1878–1953) Gnade, obwohl man in Berlin peinlich lange auf zustimmende Nachricht aus Moskau hatte warten müssen. Und so nahm die Verfassung vom 7. Oktober 1949 tatsächlich knapp und klar in Artikel 34 „Die Kunst, die Wissenschaft und ihre Lehre sind frei“ als Passus auf, nicht freilich, ohne sofort den Staatsvorbehalt mit Generalvollmacht in Absatz (2) nachzuschieben: „Der Staat nimmt an ihrer Pflege teil und gewährt ihnen Schutz, insbesondere gegen den Mißbrauch für Zwecke, die den Bestimmungen und dem Geist der Verfassung widersprechen.“ Hier ist für Pluralismus wenig Raum, denn wer den unbestimmten „Geist der Verfassung“ definiert, muss nicht erläutert werden. Eigentlich könnte ich hier meinen knappen Exkurs abbrechen, denn weder in der Verfassung vom 6. April 1968 noch in ihrer geänderten Fassung vom 7. Oktober 1978 ist von „Freiheit der Wissenschaft“ die Rede. „Wissenschaft und Forschung sowie die Anwendung ihrer Erkenntnisse sind wesentliche Grundlage der sozialistischen Gesellschaft und werden durch den Staat allseitig gefördert“, heißt es in Artikel 17 (1) der Verfassung von 1968. Und in der Verfassung von 1978 hat die Wissenschaft nicht einmal mehr Subjektcharakter. Dort liest man in Artikel 17 (1): „Die Deutsche Demokratische Republik fördert die Wissenschaft, Forschung und Bildung mit dem Ziel, die Gesellschaft und

das Leben der Bürger zu schützen und bereichern. Dem dient die Vereinigung der wissenschaftlich-technischen Revolution mit den Vorzügen des Sozialismus.“ Zwar wird auch hier wieder die Schutzpflicht der Republik bemüht; aber man achte auf die verfängliche Reihenfolge in Absatz (3): „Jeder gegen den Frieden, die Völkerverständigung, gegen das Leben und die Würde des Menschen gerichtete Mißbrauch der Wissenschaft ist verboten.“ Dem Primat der Menschenwürde wird hier der vierte Platz zugewiesen. Erst der Verfassungsentwurf des „Runden Tisches“ von April 1990 kommt fast wortgleich – nicht ganz – wieder auf die Formulierung des ersten Verfassungsentwurfs von 1946 zurück, in dem er in Artikel 19 (1) festlegt: „Die Wissenschaft ist frei. Der Staat sichert die Ausübung der Freiheit von Forschung und Lehre.“ Indes, der am „Runden Tisch“ im April 1990 entworfene Staat kam dann nicht zustande, was hier zu bewerten nicht meine Aufgabe ist.⁴⁸

7. Biographische Beispiele: Russell/Pauling

7.1 Bertrand Russell

Ein wunderbares Beispiel für den mutigen Pazifismus und zugleich pluralistisches Denken einzelner Akademiemitglieder im Ersten Weltkrieg ist sicherlich Bertrand RUSSELL (1872–1970).⁴⁹ Wenn wir heute über akademischen Pazifismus im Ersten Weltkrieg reden, dann sind es einige wenige Namen, die ganz spontan in unserer Erinnerung aufleuchten: Georg Friedrich NICOLAI (1874–1964) und Albert EINSTEIN (1879–1955) für den deutschsprachigen Kulturraum exemplarisch, Romain ROLLAND (1866–1944) ganz sicher für die frankophone Kultur. Die Rezeptionskonjunktur Bertrand RUSSELLS liegt zumindest für uns Deutsche schon ein wenig zurück, und sein Name fällt heute eher seltener in diesem Zusammenhang; allerdings ganz zu Unrecht, wie ich meine. RUSSELL wurde 1908 Fellow der *Royal Society*, der Leopoldina gehörte er leider nicht an, obwohl sie sich sehr wohl mit ihm hätte schmücken können. Ich muss RUSSELL hier kaum im Detail vorstellen. Ganz knapp daher nur das Wichtigste. Der britische Philosoph, Mathematiker und Logiker unterrichtete unter anderem am *Trinity College* in Cambridge, an der *London School of Economics*, der *Harvard University* und in Peking. 1950 wurde ihm der Nobelpreis für Literatur zugesprochen. RUSSELL galt in seiner Zeit, er starb 1970, als eine der Ikonen des akademischen Pazifismus, obwohl er eigentlich kein strikter Pazifist war und sozialistischen Ideen mehr als aufgeschlossen gegenüberstand.

Ein in vieler Hinsicht prägendes Ereignis in RUSSELLS Leben war der Erste Weltkrieg. Dessen Ausbruch ließ ihn seine mathematische Forschung zurückstellen, und RUSSELL begann, sich als Aktivist und Autor für Frieden und Kriegsdienstverweigerung einzusetzen, weil der Krieg genau das nicht nur infrage stellte, sondern zu vernichten begann, was dem Atheisten RUSSELL heilig war, Internationalismus, Pluralismus, Kooperation, Freiheit und Unvoreingenommenheit in den Wissenschaften, aber keineswegs nur dort.

⁴⁸ Vgl. zur Verfassungsgeschichte der SBZ/DDR SORGENICHT et al. 1969, MAMPEL 1997, AMOS 2006, SCHULZE WESSEL 2006.

⁴⁹ Vgl. zu Biographie und Werk RUSSELL 2010, CLARK 1984, RYAN 1988, MOORHEAD 1992.

„Ich hätte gern eine Welt, in der das Ziel der Erziehung geistige Freiheit wäre und nicht darin bestünde, den Geist der Jugend in eine Rüstung zu zwängen, die ihn das ganze Leben lang vor den Pfeilen objektiver Beweise schützen soll. Die Welt braucht offene Herzen und geistige Aufgeschlossenheit, und das erreichen wir nicht durch starre Systeme, mögen sie nun alt oder neu sein.“⁵⁰

Ganz offensichtlich teilte die Universität Cambridge solche Ansichten 1914–1918 nicht, denn sie entzog ihm seine Professur wegen eines politisch anstößigen Flugblatts, und schlimmer noch, Spekulationen über den Einsatz US-amerikanischer Soldaten in England als Streikbrecher brachten ihn für sechs Monate ins Gefängnis, wo er aber weiter las und schrieb, seine „Selbstachtung“ nicht zerstören ließ, ja die Inhaftierung sogar als Chance auffasste, über Vieles nachzudenken, was angesichts des täglichen Mordens an den Fronten weniger schmerzlich war. Mit ätzender Ironie – *vitriolic*, wie es im Englischen so schön heißt – kommentierte er allerdings die Arbeit des am Londoner Handelsministerium angesiedelten *Pelham-Committee*, das auch akademische Gesinnungskriegsgegner öffentlichen Arbeitsmaßnahmen, gern in der Landwirtschaft, zuwies. Hier endete selbst RUSSELLS liberaler Pluralismus:

„Wer einst Physik gelehrt hat, soll nun Kartoffel hacken, und wer Kartoffel hackte, der soll nun in Physik unterrichten. Kartoffeln und Physik geraten auf diese Weise beide nicht, aber zwei Männer leiden. So soll es denn wohl sein.“⁵¹

Tatsächlich hat RUSSELL lange nach dem Ersten Weltkrieg in seiner Schrift *The Impact of Science on Society* (1951) *ex post*, aber auch schon angesichts des sich entfaltenden Kalten Kriegs seine Ideen für eine Friedensgesellschaft dargelegt. Es müsse sich bei ihr um eine „scientific society“ handeln, aus der der Krieg gänzlich verbannt und in der – ganz antimalthusianisch – das Bevölkerungswachstum limitiert sei. Seine Idee gipfelte in einer einzigen übergeordneten Weltregierung, die in der Lage sei, den Frieden zu sichern. Erlösbar sei die Welt allein, so der Atheist RUSSELL, durch Kooperation.⁵²

Die Zeit des Zweiten Weltkriegs gestaltete sich schwierig für den Pazifisten RUSSELL, der übrigens in seiner Position gegen HITLER und gegen die Sowjetunion die Friedensliebe aussetzte und erst nach 1945 wieder aufleben ließ. Aber nicht daraus erwachsen Schwierigkeiten, sondern aus seinem gesellschaftlichen und moralischen Liberalismus, für den außereheliche Beziehungen ebenso wenig tabuisiert waren, wie die männliche und weibliche Homosexualität. In New York trug ihm dies Lehrverbot, in Stockholm den Nobelpreis ein, der ihm 1950 ausdrücklich für sein Buch *Marriage and Morals* (1929; dt. *Ehe und Moral* 1984) zugesprochen wurde.

Nach dem Zweiten Weltkrieg engagierte er sich vehement gegen die Vertreibung der Deutschen aus ihren östlichen Siedlungsgebieten und kurzfristig sogar – was Sie überraschen wird – für einen atomaren Präventivschlag gegen die Sowjetunion. Diese Haltung

50 „I would wish to see a world in which education aimed at mental freedom rather than at imprisoning the minds of the young in a rigid armour of dogma calculated to protect them through life against the shafts of impartial evidence. The world needs open hearts and open minds, and it is not through rigid systems, whether old or new, that these can be derived.“ (RUSSELL 1997, S. 567 = Vorwort zu: *Why I am not a Christian*.)

51 RUSSELL: An open letter to some would-be friend of the conscientious objector. (June 1916.) Zitiert nach ESTEVES 2015, S. 6.

52 Vgl. RUSSELL 1951, RUSSELL 1936, S. 173.

mündete allerdings dramatisch schnell in einen konsequenten Friedens- und Antiatomkraft-Aktivismus ein, nachdem auch die Sowjetunion über Nuklearwaffen verfügte. 1955 verfasste RUSSELL mit Albert EINSTEIN und anderen namhaften Wissenschaftlern das *Russell-Einstein-Manifest*, in dem an die Verantwortung von Wissenschaft und Forschung appelliert wurde.

Als Präsident der 1958 gegründeten *Campaign for Nuclear Disarmament* engagierte er sich in vielen Interviews, Schriften und Vorträgen für den Frieden. Er versuchte in Briefwechseln, die Präsidenten Dwight D. EISENHOWER (1890–1969) und Nikita S. CHRUSCHTSCHOW (1894–1971) zur Kooperation und zur Abrüstung zu bewegen. Daneben gründete RUSSELL 1963 die *Bertrand Russell Peace Foundation*, die auch nach seinem Tod den Einsatz für Frieden und Menschenrechte gewährleisten sollte. Er gehörte zur Opposition gegen den Vietnamkrieg und untersuchte noch im hohen Alter im Rahmen der *Russell-Tribunale* seit 1966 unter anderem mit Simone DE BEAUVOIR (1908–1986), Jean-Paul SARTRE (1905–1980), Günther ANDERS (1902–1992) und Peter WEISS (1916–1982) Kriegsverbrechen der USA in Vietnam.

Zusammenfassen lässt sich ein solch komplexer und zum Teil auch widersprüchlicher akademischer Einsatz für Freiheit, interdisziplinäre und pluralistische Ideenvielfalt, Kooperation und Weltfrieden nur sehr schwierig. Er steht aber doch auch exemplarisch für die internationalen Wirkmöglichkeiten friedlichen wissenschaftlichen Engagements, ohne das die Geschichte der Wissenschaften und der Akademien sicher ärmer wäre. Bemerkenswert ist bei alledem der bis ins hohe Alter ungebrochene Skeptizismus gegenüber fanatisch-dogmatischer Ideendiktatur. Alles muss in friedlich kooperativer Auseinandersetzung hinterfragbar bleiben. Als ihn ein Reporter der *New York Post* im Juni 1964 einmal fragte: „Professor Russell, would you be willing to die for your beliefs“, antwortete der 92-Jährige lapidar: „Of course not! After all, I may be wrong.“⁵³

7.2 Linus Pauling

Mein zweites biographisches Beispiel ist der amerikanische Chemiker Linus Carl PAULING (1901–1994),⁵⁴ Mitglied der Leopoldina seit 1960, dem für seine Forschungen über die Natur der chemischen Bindung und ihre Anwendung bei der Aufklärung der Struktur komplexer Substanzen 1954 der Nobelpreis für Chemie zugesprochen wurde. PAULING erhielt darüber hinaus 1963 für sein großes pazifistisches Engagement auch den Friedensnobelpreis. PAULING war Kind Freiburger Immigranten und hatte eine schwierige Kindheit und Jugend zu durchstehen, nachdem sein Vater, ein Apotheker, bereits 1910 plötzlich verstarb. Seine Ausbildung verlief komplex, interdisziplinär und international: *Oregon Agricultural College*, *Caltech Pasadena*, München, Kopenhagen und Zürich bei Arnold SOMMERFELD (1868–1961), Niels BOHR (1885–1962) und Erwin SCHRÖDINGER (1887–1961), um dann am *Caltech* eine ebenso rasante wie multi- und interthematische Karriere zu entwickeln: Quantenmechanik, Theoretische Chemie, Elektronenphysik, schließlich 1939 sein

53 Zur schwierigen Überlieferungsgeschichte des Zitats <https://quoteinvestigator.com/2016/03/07/never-die/> (Zugriff: 20. 1. 2019).

54 Zu Biographie und Werk PAULINGS siehe SERAFINI 1989, MARINACCI 1995, HAGER 1995, 1998, MEAD und HAGER 2001.

berühmtes Buch *The Nature of the Chemical Bond* (Die Natur der chemischen Bindung),⁵⁵ das ihm den Nobelpreis für Chemie eintrug. Wollte man den akademischen Karriereweg des durchaus patriotischen US-Bürgers PAULING bis dorthin beschreiben, so böten sich die Schlagworte förmlich an: multidisziplinär, international, in hohem Grade kooperativ und geprägt durch einen unerschütterlichen Denk- und Methodenpluralismus, der sich zunächst in keinerlei Spannungsverhältnis zu seinem Staat, den USA, befand. Dies änderte sich auch in den späten 1930er und frühen 1940er Jahren nicht, als sich PAULING zunehmend biologisch-chemischen Problemen zuwandte und mit Biologen wie Thomas Hunt MORGAN (1866–1945), Theodosius DOBZHANSKY (1900–1975), Calvin BRIDGES (1889–1938) und Alfred H. STURTEVANT (1891–1970) zusammenarbeitete. Auch hier kann ich die Ergebnisse nur mit wenigen Schlagworten skizzieren: Hämoglobin, Kristallographie, Proteinchemie und hier vor allem die Helixstruktur der Proteine, über die er mit Robert B. CORY (1897–1971) publizierte. Dabei kam die Gruppe dem Geheimnis der Doppelhelix sehr nahe, wenn ihnen nicht Rosalind FRANKLIN (1920–1958), James WATSON (*1928) und Francis CRICK (1916–2004) mit der Strukturklärung der Desoxyribonukleinsäure knapp zuvorgekommen wären.

Der Zweite Weltkrieg verursachte eine grundlegende Änderung in PAULINGS Leben. Bis zu diesem Zeitpunkt war er ziemlich unpolitisch, aber als Ergebnis seiner Erfahrungen engagierte er sich als Friedensaktivist. 1946 wurde er Mitglied des *Emergency Committee of Atomic Scientists* (Vorsitzender war Albert EINSTEIN; die sieben übrigen Mitglieder waren Harold C. UREY [1893–1981, Vice-Chairman], Hans BETHE [1906–2005], Thorfin Rusten HOGNESS [1894–1976], Philip M. MORSE [1903–1985], Leó SZILÁRD [1898–1964], Victor WEISSKOPF [1908–2002]). Das *Committee* wollte die Öffentlichkeit über die Gefahren aufklären, die von Nuklearwaffen ausgehen. PAULING erhielt 1948 noch die *Medal for Merit*, als damals höchste zivile Auszeichnung der USA, geriet dann aber schnell in den Fokus des paranoiden antikommunistischen Politikstils der USA, der als *McCarthyism* in die Geschichtsbücher eingegangen ist. Nun galt unter den Vorzeichen des Kalten Krieges der radikale *mainstream Americanism*, was PAULING bald schon empfindlich zu spüren bekommen sollte, als ihm wenige Jahre später das *US State Department* 1952 wegen seines als prokommunistisch diffamierten politischen Engagements den Reisepass verweigerte und er nicht zu einer Konferenz nach London reisen konnte, auf der es um eben die Helix-Struktur der Proteine ging. Erst internationale Proteste, u. a. Albert EINSTEINS, verhalfen ihm dann bald wieder zu Reisedokumenten. Fünf Jahre später initiierte PAULING zusammen mit dem Biologen Barry COMMONER (1917–2012) einen fulminanten Petitionsfeldzug gegen die Fortsetzung der überirdischen Atomwaffenversuche, wobei er seine Kenntnisse als Biochemiker in die Waagschale warf. PAULING und COMMONER hatten die Verteilung von radioaktivem Strontium 90 (⁹⁰Sr) in den Milchzähnen von Kindern in ganz Nordamerika untersucht und waren zu erschreckenden Ergebnissen über die dramatischen Gesundheitsrisiken dieser Atomtests und ihres radioaktiven Fallouts für die Gesundheit der Menschheit gekommen. Schließlich konnten die beiden 1958 zusammen mit PAULINGS Frau Ava Helen (geb. MILLER, 1903–1981) der US-Regierung eine Petition der Vereinten Nationen überreichen, die von mehr als 11 000 Wissenschaftlern unterzeichnet worden war und ein sofortiges Ende der Atomtests verlangte. Tatsächlich führte der sich nun entfaltende öffentliche Druck zu einem Moratorium und einem Testverbot, das John F.

55 PAULING 1939.

KENNEDY (1917–1963) und Nikita CHRUSCHTSCHOW 1963 unterschrieben. Am gleichen Tag wurde PAULING in Oslo der Friedensnobelpreis zugesprochen, weil er sich seit 1946 „nicht nur gegen Atomwaffentests, nicht nur gegen die Verbreitung von Atomwaffen, auch nicht [nur] gegen deren Verwendung, sondern gegen alle Kriegsführung als Maßnahme zur Lösung internationaler Konflikte“ eingesetzt habe.⁵⁶ Gleichwohl galt PAULING, der 1994 an Prostatakrebs verstarb, für lange Zeit noch in den USA als naiver Fürsprecher des sowjetischen Kommunismus, wurde vor Senatsausschüsse zitiert und als Agent der kommunistischen Friedensoffensive diffamiert. Das *Life Magazine* charakterisierte seinen Friedensnobelpreis als „Sonderbare Verunglimpfung aus Norwegen“.⁵⁷

PAULINGS Beispiel, das hier nicht ikonenhaft, wohl aber exemplarisch herausgehoben werden soll, zeigt deutlich, dass und wie Wissenschaftler auch unter erheblichem politischen Druck seitens ihres Staates dem wissenschaftlichen Internationalismus und der transnationalen Kooperation und dem Ideal des wissenschaftlichen Pluralismus treu bleiben können und mehr noch, wie sie selbst in unerwünschter Politikberatung ihrer moralischen Verpflichtung nicht nur gegenüber den Wissenschaften und ihren Methoden, sondern auch gegenüber der eigenen Gesellschaft, ja gegenüber dem Wohle der Menschheit erfolgreich verbunden sein können. Dass hierzu nicht nur individuelle Eigenschaften, sondern gerade auch wissenschaftliche Netzwerke als Multiplikatoren und Rückendeckung beitragen können, belegen die vielen Akademien, denen PAULING als Mitglied bereits vor seinen Nobelpreisen und seinem politischen Engagement verpflichtet war: der *National Academy of Science* seit 1933, der *American Academy of Arts and Sciences* seit 1944, der *Royal Society* und der *Académie des Sciences* seit 1948, der *Leopoldina* seit 1960 und der *Sowjetischen Akademie der Wissenschaften*, auf deren Veranlassung ihm 1968 der Internationale Lenin-Friedenspreis verliehen wurde.

8. Schluss-Plädoyer

Mein Resümee ist ein Plädoyer, ein Plädoyer für die Akademie, für die regionale wie vieler Orten in Deutschland, vor allem aber eines für die Nationale Akademie. Der Begriff der Nation ist dabei eher anachronistisch, denn er steht nicht mehr für eine völkisch-nationale Bindung, die mir absolut obsolet erscheint, sondern allenfalls noch für eine staatliche Allokation. Und das ist auch ganz in Ordnung, denn solange Staaten Akademien finanzieren, muss man Ross und Reiter nennen. Aber die Akademie, wie ich sie denke, ist nicht mehr willfähiges Ross unter einem dirigierenden Staat, der mit Schenkeldruck, Zügel

56 Vgl. hierzu: Linus Pauling – Facts. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Sun. 20 Jan 2019 (<https://www.nobelprize.org/prizes/peace/1962/pauling/facts/>; Zugriff: 20. 1. 2019 14: 52): „The atom bombs dropped on Hiroshima and Nagasaki were a turning point in Linus Pauling’s life. Together with other scientists he spoke and wrote against the nuclear arms race, and he was a driving force in the Pugwash movement. It sought to reduce the role of nuclear arms in international politics and was awarded the Peace Prize in 1995. In 1959, Linus Pauling drafted the famous ‚Hiroshima Appeal‘, the concluding document issued after the Fifth World Conference against Atomic and Hydrogen Bombs. He was one of the prime movers who urged the nuclear powers the USA, the Soviet Union and Great Britain to conclude a nuclear test ban treaty, which entered into force on 10 October 1963. On the same day, the Norwegian Nobel Committee announced that Linus Pauling had been awarded the Peace Prize that had been held over from 1962.“

57 Hier zitiert nach https://de.wikipedia.org/wiki/Linus_Pauling (Zugriff: 20. 1. 2019).

und Schnalz Richtung, Tritt und Geschwindigkeit bestimmt. Zeitgemäße Akademie ist ein durch Freiheit und Pluralität gekennzeichneter Organismus, ein im besten Sinne lebendiges Geschöpf, das nationale, transnationale und gegebenenfalls globale Politik berät, gebeten, nicht beauftragt, aber auch ungebeten und oftmals unbequem. Die Leopoldina als nationale Akademie ist darüber hinaus aber auch Forum und Symposion für eine Gemeinschaft von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die sich in offener Begegnung wie auf dem Forum der römischen Antike treffen, informieren, austauschen und kritisch ergänzen wollen, aber eben auch Symposion im kulturellen Verständnis der griechischen Antike, geselliges, schönes Beisammensein, begleitet vom Angenehmen des Lebens, das die Freiheit des intellektuellen Denkens erst ermöglicht, das Schöne mit dem Nützlichen verbindet – *prodesse et delectare*. Und zeitgemäße nationale Akademie ist nicht mehr national, sondern transnational ideen- und welt offen. DESIDERIUS ERASMUS VON ROTTERDAM (zwischen 1466 und 1469–1536) hätte heute seine Freude daran, diese, seine Idee so verfolgt zu sehen; aber er würde weinen, sähe er, wie sein Name durch völkische Engstirnigkeit einer rechtsnationalen Stiftung beschmutzt wird, deren Gründer noch nicht einmal wissen, dass ERASMUS eben nicht der Vielfalt der Nationalstaaten und ihrer Sprachen sein Wort geschenkt hat, sondern der transnationalen Idee der *Humaniora* in der *Lingua Franca* seiner Zeit, dem Lateinischen und Griechischen. Keine Sorge, das große Fass der modernen Wissenschaftssprache will ich hier gar nicht öffnen. Nur so viel: Respekt vor der Internationalität ist auch um die andere Sprache des Partners bemüht. Man gibt doch die eigene damit nicht auf. Das Englisch, das wir allenthalben im Umgang mit Kolleginnen und Kollegen als *non-native-speaker* üben, ist doch kaum mehr als ein Soziolekt, vergleichbar dem Provinzlatein des 4. Jahrhunderts. Der Schatz der je heimischen Sprache gerade in einem so multikulturellen nationalen Gebilde wie in Deutschland wird dadurch nicht geschmälert.

Ich denke, und gestatten Sie mir bitte diese Anmerkungen *pro domo*: Die Leopoldina kommt derzeit dem zeitgemäßen Idealbild der National-Akademie in hohem Maße nahe. An ihrer Internationalität und Pluralität kann kein Zweifel aufkommen; das muss hier gar nicht vertieft werden. Bedeutsam entwickelt hat sich ihre Verantwortungswahrnehmung in der Politikberatung. Mit der breitgefächerten Kompetenz ihrer Mitglieder kann sich die Leopoldina zu grundlegenden Entwicklungen und Fragen unserer Zeit äußern: Das sind im 21. Jahrhundert vor allem Klimawandel, Energieversorgung, Krankheitsbekämpfung und Gesundheit, demographischer Wandel, Wissensgesellschaft, globale Wirtschaftssysteme, Welternährung und die Verteilung natürlicher Ressourcen. Die Problemhaftigkeit dieser Felder liegt auf der Hand, wie an der Frage des Klimawandels, der Energieversorgung, aber auch an der Folgenbeseitigung industriell gesteuerter Konsumproliferation deutlich wird. Die Kontraproduktivität engstirnig national orientierter pluralitätsdestruktiver Politik im Kontext des Klimawandels wird uns derzeit in den USA *ad oculos* demonstriert. Hier zeigt sich klar, dass nur ein Korrektiv in den nationalen Akademien dem gezielten nationalstaatlichen Abbau des Wissens- und Kompetenzerwerbs wie in den USA gegensteuern kann. Im Hinblick auf die Energieversorgung muss sich Politikberatung einer Nationalen Akademie darauf konzentrieren, Alternativen zu einem profithungrigen Energiekapitalismus á la RWE aufzuzeigen, um so der Politik entscheidungsrelevante Argumente für den globalökologisch notwendigen Ausstieg aus der Kohleenergie zu liefern. Auch für die radikale Umstellung auf erneuerbare Energien kommt im Grunde nur eine unabhängige Akademieberatung der Politik als wegleitende Instanz infrage, oder wollen wir die Lösung dieser Probleme energiekapitalistischen Unternehmen oder regionalstaatli-

chen Lobbyisten überlassen? Ein Problembereich, der auch den meiner Profession als Arzt unmittelbar berührt, ist *par excellence* den Nationalen Akademien auf den Leib geschrieben: der Schutz unserer natürlichen Lebensressourcen. Die Verschmutzung unserer heimischen Gewässer und noch viel mehr der interkontinentalen Ozeane durch Nano-, Mikro- und Makroplastik hat ein dramatisches Ausmaß angenommen, das nur noch in transnationaler Kooperation und mit einem Höchstmaß an Theorien- und Methodenpluralität gelöst werden kann. Hier sind die Nationalen Akademien zu einem Höchstmaß an intelligenter Kooperation aufgerufen.

Nun sind auch Nationale Akademien plural zusammengesetzte Körperschaften mit zum Teil divergierenden Interessen. Vor diesem Hintergrund bedarf es synergetisch bündelnder Institutionen innerhalb der Nationalen Akademien, Studienzentren für Wissenschaftsforschung in Sonderheit, die erfolgreich engagiert sind, das Wissens- und Kompetenzkapital des Akademie-Binnenraums zu bündeln, Interessen zu detektieren und zu initiieren, zu kommunizieren und zu koordinieren, um so den Akademien Sprache zu verleihen. Akademien sind schon ein bisschen wie Gehirne. Gut oder weniger gut. Aber verzeihen Sie mir die Fortschreibung dieses zugegebenen Biologismus: Auch das beste Gehirn ist auf sich selbst zurückgeworfen, wenn es sich nicht auch nach außen mitteilen kann. Und gerade dazu sind Nationale Akademien heute stärker denn je aufgerufen.

Literatur

- ALBERT, H.: Konstruktion und Kritik. Aufsätze zur Philosophie des kritischen Rationalismus. Hamburg: Hoffmann und Campe 1972
- AMOS, H.: Die Entstehung der Verfassung in der sowjetischen Besatzungszone/DDR 1946–1949. Darstellung und Dokumentation. (Diktatur und Widerstand Bd. 12) Münster: LIT 2006
- BECHMANN, G.: Problemorientierte Forschung – Neue Wissenschaft? Einige Bemerkungen und Kommentare zum Thema „Problemorientierte Forschung“. TA-Datenbank-Nachrichten 8/3–4, 3–12 (1999), <http://www.itas.fzk.de/deu/tadn/tadn993/bech99a.htm>
- Bekennnis der Professoren: Bekenntnis der Professoren an den deutschen Universitäten und Hochschulen zu Adolf Hitler und dem nationalsozialistischen Staat.* Überreicht vom Nat.-soz. Lehrerbund Deutschland, Gau Sachsen, o. J. [1933]
- BERG, M.: Bayerische Akademie der Wissenschaften. In: BERG, M., und THIEL, J. (Hrsg.): Europäische Wissenschaftsakademien im „Krieg der Geister“. Reden und Dokumente 1914 bis 1920. Acta Historica Leopoldina Nr. 72, 67–100 (2018)
- BERG, M., und THIEL, J. (Hrsg.): Europäische Wissenschaftsakademien im „Krieg der Geister“. Reden und Dokumente 1914 bis 1920. Acta Historica Leopoldina Nr. 72 (2018)
- CHICKERING, R.: We Men Who Feel Most German. A Cultural Study of the Pan-German League, 1886–1914. Boston: Allen & Unwin 1984
- CLARK, R. W.: Bertrand Russel. Philosoph – Pazifist – Politiker. Aus d. Engl. übers. von H. FLIESSBACH und H.-H. WERNER. München: Heyne 1984
- DRECHSLER, W.: Kathedersozialismus and the German historical school. In: Handbook of Alternative Theories of Economic Development; pp. 109–123. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing 2016
- ECKART, W. U.: Deutsche Ärzte in China 1897–1914. Medizin als Kulturmission im Zweiten Deutschen Kaiserreich. (Medizin in Geschichte und Kultur Bd. 16) Stuttgart, New York: G. Fischer 1989
- ECKART, W. U.: Friedrich Althoff und die Medizin. In: vom BROCKE, B. (Hrsg.): Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftspolitik im Industriezeitalter: Das „System Althoff“ in historischer Perspektive. S. 375–404. Hildesheim: Lax 1991
- ECKART, W. U.: Medizin und auswärtige Kulturpolitik der Republik von Weimar – Deutschland und die Sowjetunion 1920–1932. Medizin in Geschichte und Gesellschaft 11, 105–142 (1993)
- ECKART, W. U.: Medizin und Kolonialimperialismus – Deutschland 1884–1945. Paderborn: Schöningh 1997

- ECKART, W. U.: Aus Europa eine organische Einheit schaffen: Georg Friedrich Nicolai (1874–1964) und sein „Aufruf an die Europäer“ im Oktober 1914. In: ECKART, W. U., und GODEL, R. (Hrsg.): „Krieg der Gelehrten“ und die Welt der Akademien 1914–1924. Acta Historica Leopoldina Nr. 68, 31–44 (2016)
- ECKART, W. U., und GODEL, R. (Hrsg.): „Krieg der Gelehrten“ und die Welt der Akademien 1914–1924. Acta Historica Leopoldina Nr. 68 (2016)
- ESTEVE, O.: Bertrand Russell, the utilitarian pacifist. *Revue Française de Civilisation Britannique. French Journal of British Studies* XX–1 (2015), <https://journals.openedition.org/rfcb/308#ftn32>
- FEYERABEND, P. K.: Problems of empiricism. In: COLODNY, R. G. (Ed.): *Beyond the Edge of Certainty. Essays in Contemporary Science and Philosophy. Vol. II*, pp. 145–260. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall 1965
- FEYERABEND, P.: *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. London: Verso 1975
- FEYERABEND, P.: *Wider den Methodenzwang: Skizze einer anarchistischen Erkenntnistheorie*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1976
- FEYERABEND, P.: *Science in a Free Society*. London: NLB 1978
- FEYERABEND, P. K.: *Problems of Empiricism*. Cambridge (Mass.): Cambridge University Press 1981
- FISCHER, Ernst Peter: *Die andere Bildung. Was man von den Naturwissenschaften wissen sollte*. 4. Aufl. Berlin: Ullstein 2005
- HAGER, T.: *Force of the Nature: The Life of Linus Pauling*. New York: Simon & Schuster 1995
- HAGER, T.: *Linus Pauling and the Chemistry of Life*. New York: Oxford University Press 1998
- HETHERINGTON, S.: Fallibilism. In: *Internet Encyclopedia of Philosophy*. <https://www.iep.utm.edu/fallibil/> (Zugriff: 18. 1. 2019)
- HOLZEY, H.: Interdisziplinarität. In: *Historisches Wörterbuch der Philosophie* Bd. 4, Sp. 476–478 (1976)
- HUSSERL, E.: Die Krisis des europäischen Menschentums und die Philosophie. Internetedition in der Bibliotheca Augustana. http://www.fh-augsburg.de/~harsch/germanica/Chronologie/20Jh/Husserl/hus_kris.html (letzter Zugriff: 20. 12. 2006 08:28:03)
- JASPERS, K.: *Die Idee der Universität*. Berlin: Springer 1923
- JASPERS, K.: *Die Geistige Situation der Zeit*. (Sammlung Göschen Bd. 1000) Berlin, Leipzig 1931
- JASPERS, K.: *Die Idee der Universität*. [Neufassung] Berlin: Springer 1946
- JASPERS, K., und ROSSMANN, K.: *Die Idee der Universität. Für die gegenwärtige Situation entworfen von K. JASPERS und K. ROSSMANN*. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1961
- KINNEL, B.: Voltaire never said it! *Modern Language Notes* 58/7, 534–535 (1943)
- KRAUSE, W.: *Werner Sombarts Weg vom Kathedersozialismus zum Faschismus*. Dissertation. Berlin 1962
- LENGER, F.: *Sozialwissenschaft um 1900: Studien zu Werner Sombart und einigen seiner Zeitgenossen*. Frankfurt (Main): Peter Lang 2011
- MAASS, K.: *Kultur und Außenpolitik. Handbuch für Wissenschaft und Praxis*. 3. Aufl. Baden-Baden: Nomos 2015
- MAMPEL, S.: *Die sozialistische Verfassung der Deutschen Demokratischen Republik: Kommentar; mit einem Nachtrag über die Rechtsentwicklung bis zur Wende im Herbst 1989 und das Ende der sozialistischen Verfassung*. 3. Aufl. Goldbach: Keip 1997
- MANSFELD, J.: *Die Vorsokratiker*. 2 Bde. Stuttgart: Reclam 1983
- MARINACCI, B. (Ed.): *Linus Pauling in His Own Words. Selections from His Writings, Speeches, and Interviews*. New York: Simon & Schuster 1995
- MEAD, C., and HAGER, T. (Eds.): *Linus Pauling – Scientist and Peacemaker*. Corvallis: Oregon State University Press 2001
- MOORHEAD, C.: *Bertrand Russell: A Life*. London: Sinclair-Stevenson 1992
- OPPENHEIM, H. B.: *Der Katheder-Socialismus*. Berlin 1872
- PAULING, L.: *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals. An Introduction to Modern Structural Chemistry*. Ithaca, New York: Cornell University Press 1939
- PAULING, L.: *Linus Pauling – Facts*. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2019. Sun. 20 Jan 2019, <https://www.nobelprize.org/prizes/peace/1962/pauling/facts/> (Zugriff: 20. 1. 2019)
- POPPER, K. R.: *Logik der Forschung: zur Erkenntnistheorie der modernen Naturwissenschaft*. (Schriften zur wissenschaftlichen Weltauffassung Bd. 9) Wien: Springer 1935
- POPPER, K. R.: *The Logic of Scientific Discovery*. London: Routledge 1959
- POPPER, K. R.: *Vermutungen und Widerlegungen. Das Wachstum der wissenschaftlichen Erkenntnis. Teilbd. I. Vermutungen*. Tübingen: J. C. B. Mohr (Paul Siebeck) 1994
- POPPER, K. R.: *Realism and the Aim of Science. From the “Postscript to the Logic of Scientific Discovery”*. Ed. by W. W. BARTLEY. III. London, New York: Routledge 1999
- POPPER, K. R.: *Die Welt des Parmenides. Der Ursprung des europäischen Denkens*. München, Zürich: Piper 2005
- RINGER, F. K.: *Die Gelehrten: der Niedergang der deutschen Mandarine 1890–1933*. Stuttgart: Klett-Cotta 1983

- RONZHEIMER, M.: Pluralismus ist nicht erwünscht – Akademie-Präsident Günter Stock kritisiert den zu großen Einfluss der Gesellschaft auf die Forschung. Er fürchtet den Niedergang der Wissenschaftsfreiheit. TAZ online, 4. Juli 2014 (<http://www.taz.de/!5038528/>) (Zugriff: 18. 1. 2019).
- RUSSELL, B.: *Marriage and Morals*. London: Allen and Unwin 1929
- RUSSELL, B.: *Which Way to Peace?* London: Joseph 1936
- RUSSELL, B.: *The Impact of Science on Society*. New York: Columbia University Press 1951
- RUSSELL, B.: *Ehe und Moral*. Darmstadt: Darmstädter Blätter 1984
- RUSSELL, B.: *Last Philosophical Testament 1943–1968*. Ed. by J. G. SLATER. (Collected Papers of Bertrand Russel Vol. 1/) London, New York: Routledge 1997
- RUSSELL, B.: *Autobiography*. London, New York: Routledge 2010
- RYAN, A.: *Bertrand Russell: A Political Life*. London: Allan Lane 1988
- SCHNEIDWIND, U., und SINGER-BRODOWSKY, M.: *Transformative Wissenschaft: Klimawandel im deutschen Wissenschafts- und Hochschulsystem*. Marburg: Metropolis-Verlag 2013
- SCHULZE WESSEL, J.: *Mächtiger Autor – Ohnmächtiger Interpret. Die Verfassungsgebung in der Deutschen Demokratischen Republik*. In: VORLÄNDER, H. (Hrsg.): *Die Deutungsmacht der Verfassungsgerichtsbarkeit*. S. 363–378. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2006
- SERAFINI, A.: *Linus Pauling – A Man and His Science*. New York (NY): Paragon House 1989
- SORGENICHT, K., WEICHLER, W., RIEMANN, T., und SEMLER, H.-J. (Hrsg.): *Verfassung der Deutschen Demokratischen Republik. Dokumente, Kommentare*. 2 Bde. Berlin/DDR: Staatsverlag der DDR 1969
- SPINNER, H. F.: *Theoretischer Pluralismus*. In: ALBERT, H. (Hrsg.): *Sozialtheorie und soziale Praxis*. Eduard Baumgarten zum 70. Geburtstag. S. 17–41. Meisenheim: Hain 1971
- STECK, R.: *Organisationsformen und Kooperationsverhalten interdisziplinärer Forschergruppen im internationalen Vergleich*. In: PFETSCH, F. R. (Hrsg.): *Internationale Dimensionen in der Wissenschaft*. S. 87–108. Erlangen: Institut für Gesellschaft und Wissenschaft 1979
- TALLENTYRE, S. G. [= E. B. HALL]: *The Friends of Voltaire*. London: Murray 1906
- VÖLKERLING, F.: *Der deutsche Kathedersozialismus*. Dissertation. Halle 1959
- VOM BROCKE, B. (Hrsg.): *Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftspolitik im Industriezeitalter: Das „System Althoff“ in historischer Perspektive*. Hildesheim: Lax 1991
- VOM BRUCH, R.: *Weltpolitik als Kulturmission. Auswärtige Kulturpolitik und Bildungsbürgertum in Deutschland am Vorabend des Ersten Weltkriegs. (Quellen und Forschungen aus dem Gebiet der Geschichte N. F. Heft 4)* Paderborn, München, Wien, Zürich: Schöningh 1982
- VOM BRUCH, R.: *Bürgerliche Sozialreform im deutschen Kaiserreich*. In: VOM BRUCH, R. (Hrsg.): *Weder Kommunismus noch Kapitalismus – Bürgerliche Sozialreform in Deutschland vom Vormärz bis zur Ära Adenauer*. S. 61–179. München: C. H. Beck 1985
- WASCHKUHN, A.: *Kritischer Rationalismus – Sozialwissenschaftliche und politiktheoretische Konzepte einer liberalen Philosophie der offenen Gesellschaft*. München, Wien: Oldenbourg 1999
- WEBER, M.: *Der Sinn der ‚Wertfreiheit‘ der soziologischen und ökonomischen Wissenschaften (1917)*. In: WEBER, M.: *Gesammelte Aufsätze zur Wissenschaftslehre*. Tübingen: Mohr 1988
- WEINBERG, A.: *Reflections on Big Science*. Cambridge (MA): MIT Press 1969
- WEINBERG, A.: *Probleme der Großforschung*. Frankfurt (Main): Suhrkamp 1970

Prof. Dr. Wolfgang ECKART
Reinhard-Hoppe-Straße 15
69118 Heidelberg
Bundesrepublik Deutschland

Demographisches Altern Chancen und Herausforderungen einer Gesellschaft des längeren Lebens

Ursula M. STAUDINGER ML (New York, NY, USA)



Zusammenfassung

Im Laufe der letzten 100 Jahre hat sich die durchschnittliche Lebenserwartung um 30 Jahre erhöht. Und nicht nur das: Man erreicht das höhere Alter auch bei besserer Gesundheit. Diese Verlängerung des Lebens birgt für Individuen und Gesellschaft Herausforderungen, aber auch große Chancen. Alter und Altern, wie wir es heute kennen und erleben, ist nur eine Momentaufnahme. Menschliche Entwicklung und Altern sind nicht determiniert, sondern entstehen aus der fortwährenden Wechselwirkung zwischen Biologie, Person und Kultur. Altern, auch in seinen biologischen Anteilen, ist durch Einflüsse von Gesellschaft und Individuum – innerhalb biologisch gesetzter Grenzen – veränderbar. Lebenslaufstrukturen und Altersbild sind allerdings immer noch durch das traditionelle Bild des Alterns geprägt. Sie stammen aus einer Zeit, in der unsere Lebenserwartung, die Qualität des Lebens im Alter und die Verteilung von Aufgaben über die Lebensspanne ganz andere waren als heute. Die Zukunftsfähigkeit einer Gesellschaft mit einer älter werdenden Bevölkerung hängt von ihrem Veränderungswillen ab. Wichtige Schritte zur Veränderung veralteter Ordnungen in der Welt der Bildung, des Arbeitsmarkts und in der Volkswirtschaft, in den Regionen und den Gemeinden, in Familie, Zivilgesellschaft und Politik, in den Köpfen der Menschen und in der Praxis des Alltags. Die moderne Alternforschung liefert hierzu wichtige Befunde.

Abstract

Average life expectancy has increased by more than 30 years over the last 100 years, and old age is linked with better health than in preceding generations. This lengthening of lives is a gift gained from societal development which harbors opportunities as well as challenges for individuals and societies alike. Old age and the aging process, as we currently observe and experience it, is but a snapshot in time. Human aging is not determined. Rather it emerges from continuous interactions between organism, person and context. Thus, aging is – within genetically set limits – modifiable through individual actions and societal conditions. Lifecourse structures as well as images of aging and old age, however, are still reflecting human aging as it was observed in previous generations. They were forged at a time of lower life expectancies, worse late-life health and life tasks following a different distribution across the life course. The future potential of a society with an aging population depends on its willingness to adapt. An overall mind shift is needed in the general population's outlook on aging as well as changes in social systems, in particular with regard to education, the labor market, regional planning, the family life cycle, civil society and of course policy making. The science of aging has been accruing important findings to support such transformations.

1. Die Nationale Akademie hat das Thema früh erkannt und die gesellschaftliche Diskussion mit beeinflusst

Seit den frühen 2000er Jahren beschäftigen sich interdisziplinäre Arbeitsgruppen der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina mit der Thematik des demographischen Wandels und des Alterns. Tabelle 1 listet die wichtigsten Stellungnahmen auf, die aus diesen Aktivitäten in den letzten zehn Jahren entstanden sind. Die Breite des Themenfeldes wird nicht nur an den Titeln dieser Schriften, sondern auch an der Tatsache deutlich, dass in den letzten zehn Jahren mehr als 80 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 30 Disziplinen und 10 Nationen an diesen Stellungnahmen mitgearbeitet haben. Diese Zahlen sprechen für die Reichhaltigkeit der Expertise, die die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina in ihren Reihen versammelt hat. Das Themenfeld wird darüber hinaus kontinuierlich von der wissenschaftlichen Kommission „Demographischer Wandel und Altern“ betreut. Und schließlich halten zwei aktive und gut besuchte Webseiten (www.altern-in-Deutschland.de, www.zukunft-mit-Kindern.de) über neueste Befunde und gesellschaftliche Diskussionen zu dem Themenbereich die Öffentlichkeit auf dem Laufenden.

Tab. 1 Überblick der wichtigsten Stellungnahmen zum Themenfeld „demographisches Altern“ zwischen 2008 und 2018

Titel der Stellungnahme	Veröffentlichung
Gewonnene Jahre. Altern in Deutschland More Years, More Life (engl. Übersetzung) (8 Materialienbände, 1 Empfehlungsband)	2009
Zukunft mit Kindern. Fertilität und gesellschaftliche Entwicklung A Future with Children (engl. Übersetzung) (1 Materialienband, 1 Empfehlungsband)	2012
Mastering Demographic Change in Europe (Gemeinsame Stellungnahme von 8 europäischen Ländern)	2014
Medizinische Versorgung im Alter – Welche Evidenz brauchen wir? Medical Care for older People – What Evidence Do We Need? (engl. Übersetzung) (1 Materialienband, 1 Empfehlungsband)	2015
Wissenschaftliche und gesellschaftliche Bedeutung von bevölkerungsweiten Längsschnittstudien The Relevance of Population-based Longitudinal Studies for Science and Social Policies (engl. Übersetzung) (1 Materialienband, 1 Empfehlungsband)	2016

Es ist keine Übertreibung, festzuhalten, dass die Stellungnahmen und Aktivitäten der Nationalen Akademie seit 2009 einen wesentlichen Beitrag dazu geleistet haben, dass im politischen und gesellschaftlichen Dialog zum demographischen Wandel in Deutschland nicht mehr ausschließlich von den Problemen, sondern ebenso von den Chancen der „gewonnenen Jahre“ die Rede ist. Auch international lässt sich ein Wandel im Tenor der Demographiedebatte feststellen. So veröffentlicht die Weltbank 2015 einen Bericht mit dem Titel „Golden Aging“ (BUSSOLO et al. 2015), die Weltgesundheitsorganisation berichtet über die Zugewinne an den gesunden Jahren im Alter (WHO 2015). Und schließlich spricht

auch das *World Economic Forum* 2018 vom Mythos der „alternden Gesellschaft“, den es an der Realität zu messen gilt (SCOTT 2018), ein fast wörtliches Zitat aus den Empfehlungen der Akademienarbeitsgruppe (*Akademiengruppe Altern in Deutschland* 2009).

2. Demographische Alterung: Historische Entwicklung und Trends

Seit der systematischen Aufzeichnung von Geburts- und Sterbedaten in verschiedenen Ländern Mitte des 19. Jahrhunderts hat sich die durchschnittliche Lebenserwartung bei Geburt um mehr als 30 Jahre erhöht (OEPPEM und VAUPEL 2002). In der Stellungnahme der Akademiengruppe sprechen wir deshalb von der „Gesellschaft des längeren Lebens“. Ein Begriff, der es seither auch in die öffentliche Demographiedebatte geschafft hat und der hoffentlich den Begriff der „alternden Gesellschaft“ letztendlich ganz verdrängen wird. Die Bezeichnung „alternde Gesellschaft“ beinhaltet einen logischen Fehler. Es ist die Bevölkerung, die altert, und nicht die Gesellschaft. Welche Entwicklung eine Gesellschaft mit alternder Bevölkerung nimmt, hängt von den Veränderungen ab, die diese Gesellschaft in der Gesetzgebung, der öffentlichen Meinung und den zentralen Institutionen, wie Arbeitsmarkt, Bildungs- und Gesundheitssystem, vornimmt, um der veränderten Alterszusammensetzung gerecht zu werden. Rückt man das längere Leben in den Mittelpunkt, wird deutlich, welches Potential in dieser zivilisatorischen Entwicklung steckt. Gesundheitsvorsorge, lebenslanges Lernen und Veränderungen im Arbeitsmarkt spielen eine zentrale Rolle beim Erfolg einer Gesellschaft des längeren Lebens. Gegenwärtige Trendrechnungen weisen keine Abflachung dieser Entwicklung der Lebenserwartung auf.

Die Gründe dieser außergewöhnlichen Entwicklung der Lebenserwartung sind vielfältig. Zuvorderst sind die ökonomische Entwicklung und die Entwicklung des öffentlichen Gesundheitswesens (z. B. Hygiene) sowie der Zuwachs an medizinischem Wissen und Therapien zu nennen, gefolgt von der Entwicklung und Ausdehnung des Bildungssystems sowie der Humanisierung der Arbeitswelt. Historisch haben diese Einflussgrößen zunächst die Sterblichkeit in den ersten 30 Jahren des Lebens verringert, allerdings im Verlauf des 20. Jahrhundert kommen die Zuwächse der Lebenserwartung hauptsächlich aus der zweiten Lebenshälfte. So hat sich die Lebenserwartung im Alter 60 um etwa 10 Jahre, von einer verbleibenden Lebenserwartung von 15 Jahren im Jahr 1900 zu einer verbleibenden Lebenserwartung im Alter 60 von 25 Jahren im Jahre 2010 erhöht.

Die Beschreibung der demographischen Alterung ist nicht komplett ohne die Betrachtung der Fertilitätsentwicklung. Die Erhöhung der Lebenserwartung und die Verringerung der Fertilität gehen weltweit Hand in Hand. Mit dem Anstieg der Überlebenswahrscheinlichkeit jedes geborenen Kindes, der Erhöhung des Lebensstandards und dem Anstieg des Bildungsniveaus, besonders von Frauen, entscheiden sich Paare für weniger Kinder, in die jedoch jeweils mehr Zeit und Geld investiert werden als zuvor. Mitte des 19. Jahrhundert brachte eine Frau im Durchschnitt 5 Kinder zur Welt, 1950 lag diese Zahl in der entwickelten Welt bei knapp unter 3 Kindern und sank dann bis 2000 auf 1,6 Kinder ab. Inzwischen steigt die Fertilität (im Sinne von Periodenfertilität) in den Ländern mit hohem Lebensstandard (*high income countries*) wieder an und liegt gegenwärtig nach den Zahlen der Vereinten Nationen (UN) bei 1,8. Es wird erwartet, dass sich die Fertilität bis Ende des 21. Jahrhunderts bei 2 Kindern einpendeln wird (UN DESA 2017). Für Deutschland hat das Statistische Bundesamt 2018 einen sich stabilisierenden Aufwärtstrend der Geburtenrate

von 1,3 Geburten (pro Frau) in den 1990er und 2000er Jahren zu 1,6 Kindern 2018 festgestellt. In der Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften *Zukunft mit Kindern* (STOCK et al. 2012) wurden drei zentrale Ressourcen identifiziert, die vorhanden sein müssen, damit sich Paare für Kinder entscheiden:

- (1.) Zeit, d. h., es muss für beide Elternteile möglich sein, Beruf und Kinder miteinander zu vereinbaren.
- (2.) Geld, d. h., es muss genügend Geld vorhanden sein, so dass Eltern davon ausgehen können, dem Kind gute Entwicklungsmöglichkeiten bieten zu können und Kinder nicht zum Armutrisiko beitragen.
- (3.) Betreuungsinfrastruktur, d. h., es muss genügend qualitätsvolle und bezahlbare Betreuungsplätze geben, angefangen von der Krippe bis hin zur Ganztageschule.

Die Stellungnahme warnt davor, in der Analyse der historischen Geburtenentwicklung simplifizierende, eindimensionale Kausalitäten zu unterstellen. Vielmehr zeigt die Forschung, dass die Entscheidung für Kinder eine multifaktorielle, dyadische Entscheidung ist. Die Stellungnahme macht auch sehr nachdrücklich deutlich, dass Versuche, eindimensionale bevölkerungspolitische Maßnahmen, für die es Hinweise auf Erfolg, etwa im Sinne einer Erhöhung der Geburtenraten, aus anderen Ländern gibt, zu übernehmen, nicht sinnvoll sind. Aufgrund kulturhistorischer Unterschiede ist der Erfolg nicht ohne Weiteres auf ein anderes Land übertragbar.

Die beiden Trends, also die Erhöhung der Lebenserwartung und die Verringerung der Geburtenrate, sind seit geraumer Zeit keineswegs mehr auf die entwickelten Länder beschränkt, sondern inzwischen weltweit zu beobachten. Dies hat zur Folge, dass Trendberechnungen der Entwicklung der Weltbevölkerung inzwischen eine Abflachung des Wachstums der Weltbevölkerung vorhersagen. Je nach Szenario kommt es bereits 2070 zu einer Stabilisierung bei etwa 9 bis 10 Milliarden oder erst 2100 bei etwa 11 Milliarden (LUTZ et al. 2018). Falls die Annahmen hinsichtlich der Entwicklung von Fertilität, Lebenserwartung und Migration, die in solche Projektionen eingehen, durch die tatsächliche demographische Entwicklung nicht völlig widerlegt werden, wird es gegen Ende des 21. Jahrhunderts zum Beginn eines Paradigmenwechsels kommen, weg vom Fokus auf quantitatives Wachstum hin zur Unterstützung qualitativen Wachstums. Hieraus ergeben sich auch Möglichkeiten, wie diese demographischen Trends für die Auseinandersetzung mit anderen Megatrends dem Klimawandel und dem drohenden Ressourcenmangel hilfreich sein können (vgl. *European Academies Network* 2014).

3. Der Anteil alter Menschen an der Bevölkerung wächst: Grund zur Sorge?

Im Zusammenhang mit diesen globalen Trendberechnungen werden auch Hochrechnungen für den Anteil der über 65-Jährigen an der Weltbevölkerung erstellt. Je nach Szenarium rangiert der Anteil im Jahr 2100 weltweit zwischen 23 % und knapp 30 %. Für Deutschland wird dieser Wert nach den letzten Schätzungen des Bundesinstituts für Bevölkerungsforschung bis im Jahr 2060 bei 31 % liegen. Gerne werden diese Prozentwerte in der öffentlichen und der politischen Debatte als alarmierend dargestellt. Der Alarm wird

unter anderem durch den demographischen Alten(last)quotienten ausgelöst, der sich aus dem Verhältnis der 65-Jährigen und Älteren zu den 20- bis 64-Jährigen berechnet. Die ökonomische Logik dahinter ist, dass je höher dieser Wert ist, desto geringer ist die Produktivität der Gesellschaft und damit die Gefahr des Verlusts an Lebensstandard. Die Nutzung des Alters 65 Jahre leitet sich aus dem historisch gewachsenen Renteneintrittsalter ab, und man geht davon aus, dass die Produktivität nach dem Renteneintritt auf null sinkt. Abgesehen davon, dass die reale Rentenpolitik in vielen Ländern diese Altersgrenze inzwischen modifiziert hat und weiter modifizieren wird, hat die interdisziplinäre Altersforschung in den letzten Jahrzehnten eindrucksvoll gezeigt, dass das kalendarische Alter keineswegs mit dem Ausmaß an Fertigkeiten von Personen oder deren Produktivität gleichzusetzen ist (SKIRBEKK et al. 2018). Die öffentliche und politische Debatte beschäftigt sich hingegen bisher nur selten mit der Tatsache, dass es in der menschlichen Geschichte erstmals so sein wird, dass es genauso viele Personen unter 30 Jahren, wie zwischen 30 und 60 und zwischen 60 und 90 Jahren geben wird. Es sollte beleuchtet werden, welche Möglichkeiten einer Gesellschaft aus diesem generationalen Miteinander erwachsen und welcher Voraussetzungen es bedarf, damit dieses Miteinander auch außerhalb der Familie stattfinden und produktiv sein kann.

3.1 Verzerrte Wahrnehmung durch ein einseitig negatives Altersstereotyp

Das einseitig negative Stereotyp, dass mit höherem Alter immer krankheitsbedingte Hinfälligkeit, weniger kognitive Kompetenz bis hin zur Demenz oder auch Antriebslosigkeit verbunden sind, ist immer noch weit verbreitet, und es hat nicht nur negative Konsequenzen für die Chancen älterer Arbeitnehmer im Arbeitsmarkt, etwa im Sinne von Altersdiskriminierung, wenn es um Einstellungen geht. Auch die Erwartungen älterer Personen an das eigene Alter sind nicht selten Opfer eines solchen einseitig negativen Altersstereotyps (EHMER und HÖFFE 2009). So konnte eine Längsschnittstudie zeigen, dass Personen, die im Alter von 50 Jahren angaben, dass sie eine negative Einstellung zum Alter haben, eine 7 Jahre geringere Lebenserwartung hatten als Personen, die angegeben hatten, dass sie eine positive Einstellung zum Alter hatten. Dieser Befund ist kontrolliert für sozioökonomischen Status, subjektives Wohlbefinden und objektive Gesundheit zum Zeitpunkt der Befragung. Es zeigte sich auch, dass ein wichtiger vermittelnder Mechanismus der Verlust an Lebenssinn zu sein schien (LEVY et al. 2002). Insofern sind die negativen Konsequenzen solcher einseitig negativer Altersstereotype für die Gesundheit und Produktivität einer alternden Bevölkerung nicht zu unterschätzen.

3.2 Historische Veränderungen menschlichen Alterns

Auch wenn sie zur Verzerrung und Überhöhung neigen, entbehren (negative) Stereotype sicherlich nicht einer realen Grundlage. Allerdings lösen sie sich dann von der Realität ab und vergrößern diese holzschnittartig. Dadurch gewinnen sie vor allem, wenn sie einseitig angewendet werden, eine sehr negative Zugkraft. Einmal entstandene Stereotype zeigen eine große Verharrungstendenz und passen sich nur äußerst langsam an neue Realitäten an. Da nun menschliches Altern jedoch nicht durch genetische Einflüsse determiniert ist,

sondern das Ergebnis der kontinuierlichen Wechselwirkung zwischen biologischen, sozio-kulturellen Einflüssen und Entscheidungen der alternden Person ist, ist menschliches Altern durch hohe Plastizität oder Modifizierbarkeit gekennzeichnet (z. B. BALTES et al. 2006, STAUDINGER et al. 1995). Diese Plastizität menschlichen Alterns wird beispielsweise eindrucksvoll illustriert an der Erhöhung der durchschnittlichen Lebenserwartung, von der schon die Rede war. Eine wichtige Konsequenz dieser Befunde ist, dass das kalendarische Alter keine Erklärungskraft haben kann, sondern vielmehr zu unterschiedlichen historischen Zeitpunkten und für unterschiedliche Personen unterschiedliche Kompetenzprofile mit sich bringt. Da die oben vorgestellten Alterslastquotienten also ungeeignet sind, die Konsequenzen der Alterung der Bevölkerung für die Gesellschaft zu bestimmen, stellt sich die Frage nach den Alternativen.

4. Die gesellschaftlichen Konsequenzen der Alterung der Bevölkerung lassen sich gestalten

Im Folgenden werden Befunde zu den zentralen Einflussgrößen diskutiert, die mitbestimmen, welche Entwicklung eine Gesellschaft mit alternder Bevölkerung nimmt.

4.1 Beteiligung älterer Menschen am Arbeitsmarkt

In Band 3 der Stellungnahme der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina *Gewonnene Jahre* (BÖRSCH-SUPAN et al. 2009) wurde folgende Modellrechnung angestellt, um zu zeigen, welche Hebelkraft das Ausmaß der Beteiligung älterer Personen am Arbeitsmarkt hat. Nimmt man als Ausgangspunkt den Lebensstandard (BIP/Kopf) 2003 in Deutschland und stellt die Alterung der Bevölkerung und die Arbeitsmarktbeteiligung der 55+-Jährigen im Jahre 2009 in Rechnung, so führt dies zu einem Verlust an Lebensstandard von 16%. Erhöht man nun die Erwerbsbeteiligung der 55+-Jährigen nur um die Hälfte dessen, was in der Agenda 2010 gefordert war, so verringert man die Lebensstandardeinbußen bereits auf 8,4%. Und wenn es schließlich gelingt, die Arbeitsmarktbeteiligung der 55+-Jährigen auf das Niveau von Dänemark oder der Schweiz im Jahre 2009 zu erhöhen, so verringern sich die Einbußen an Lebensstandard aufgrund der Alterung auf 3,4%. Ein Verlust, der durch technologische Produktivitätsgewinne auszugleichen ist. Da nicht davon auszugehen ist, dass sich Personen im Alter 55+ in Dänemark und in der Schweiz grundsätzlich von solchen in Deutschland unterscheiden, sollte die Erhöhung der Arbeitsmarktbeteiligung der 55+-Jährigen mit Hilfe der richtigen arbeitsmarktpolitischen Maßnahmen auch in Deutschland machbar sein. Und die Realität zeigt, dass es in der Tat möglich ist, die Arbeitsmarktbeteiligung der 55+-Jährigen zu erhöhen. Nach den Angaben des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales hat sich die Arbeitsmarktbeteiligung der 55–64-Jährigen in Deutschland seit 2009, also in den letzten 10 Jahren, von 56% auf 71% erhöht und die der 65- bis 74-Jährigen hat sich von 7% auf 16% sogar verdoppelt. Es ist unwahrscheinlich, dass diese Entwicklung stattgefunden hätte, wenn ältere Arbeitnehmer vornehmlich krank und kognitiv beeinträchtigt wären. Dennoch soll im Folgenden die Evidenz zur Leistungsfähigkeit im Alter in diesen beiden Funktionsbereichen zusammengefasst werden.

4.2 Gesundheitszustand älterer Menschen

Ein längeres Leben ist für jeden Einzelnen wenig angenehm und für die Gesellschaft schwer zu finanzieren, falls die gewonnenen Jahre primär in Abhängigkeit und gar Bettlägerigkeit verbracht werden. Deshalb haben sich epidemiologische Studien in der ganzen Welt mit der Frage beschäftigt, ob der Anteil der ohne Pflegebedürftigkeit verbrachten Jahre an den gewonnenen Jahren geringer ist als der Zuwachs an Lebenslänge. Die Befunde aus unterschiedlichen Ländern waren zunächst widersprüchlich. Inzwischen hat sich die Ergebnislage harmonisiert, und man kann sagen, dass die Anzahl der verbleibenden Jahre im Alter 65/75, die nicht in Pflegebedürftigkeit verbracht werden, größer ist als die Anzahl der pflegebedürftigen Jahre (CHRISTENSEN et al. 2009, CRIMMINS et al. 2016). In einer breit angelegten metaanalytischen Studie konnte VAUPEL (2010) zeigen, dass sich das Gesundheitsalter im Vergleich zum kalendarischen Alter im Laufe einer Generation um etwa 10 Jahre „verjüngt“. Auch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Demenz, eines der großen Schreckgespenster des Alters, hat sich in den letzten 20 Jahren verringert. Zunächst waren dies Daten aus Großbritannien (MATTHEWS et al. 2013), doch inzwischen wurden diese Befunde für 7 weitere europäische Länder und zuletzt auch für die Vereinigten Staaten von Amerika bestätigt (WU et al. 2015, SATIZABAL et al. 2016).

4.3 Kognitive Kompetenz (Humanvermögen) im Alter

Veränderungen in den intellektuellen Leistungen und kognitiven Prozessen, die mit dem Alter zu beobachten sind, beruhen auf einem komplexen Zusammenspiel biologischer und kulturell vermittelter Einflüsse (BALTES et al. 2006). Das „Altern der Intelligenz“ ist dementsprechend kein einheitlicher Prozess, sondern Fähigkeiten altern in sehr unterschiedlicher Weise. So lässt die kognitive Mechanik, also etwa die Geschwindigkeit, mit der wir Wahrnehmungs- und Denkaufgaben lösen, aber auch das Arbeitsgedächtnis, in der Regel schon ab dem 25. bis 30. Lebensjahr nach. Diese auf der Verhaltensebene gemessenen Veränderungen stehen in Zusammenhang mit neuronalen Veränderungen im Gehirn (Verlust synaptischer Verknüpfungen, geringere Verfügbarkeit von Transmittern, geringere Anzahl an Neuronen, schlechtere Gehirndurchblutung).

Die Pragmatik der Intelligenz hingegen, die auf erworbenem Wissen und Lebenserfahrung aufbaut, zeigt Stabilität und kann unter bestimmten Bedingungen sogar bis ins hohe Alter Zugewinne aufweisen (z.B. STAUDINGER 2015). Die Mechanik und die Pragmatik des Denkens stehen glücklicherweise nicht unverbunden nebeneinander. Das sich bis ins höhere Lebensalter hinein entwickelnde Wissen und die Erfahrungsschätze helfen dabei, die Abbauerscheinungen in der kognitiven Mechanik bis zu einem bestimmten Ausmaß auszugleichen oder zu kompensieren. Beispielsweise hat sich bei der Untersuchung beruflich erworbener Expertise gezeigt, dass man sich mit zunehmender Erfahrung in einem Bereich Strategien erwirbt, die es erlauben, verlangsamte Reaktionszeiten oder verschlechterte Gedächtnisleistungen auszugleichen. Im Bereich der Lebenserfahrung und dem Umgang mit schwierigen Lebensproblemen zeigt sich, dass in einem Altersbereich von 25 bis 75 Jahren, trotz nachlassender Leistungen im Bereich der Mechanik des Geistes, kein Abbau in der Urteilsfähigkeit im Bereich schwieriger und existentieller Lebensprobleme zu beobachten ist. Dieser Befund ist inzwischen über mehrere Studien hinweg repliziert wor-

den. Allerdings muss auch festgehalten werden, dass mit zunehmendem Alter im Durchschnitt keine Zunahme in solchen weisheitsbezogenen Leistungen festzustellen ist. Altern alleine reicht nicht aus, um weise zu werden (STAUDINGER 1999).

Das gut abgestimmte Zusammenspiel von Mechanik und Pragmatik des Denkens verhilft dazu, dass die Abbauerscheinungen der Mechanik im täglichen Leben und im Beruf nicht zu Tage treten, sondern nur unter zeitlichem oder auch emotionalem Stress sichtbar werden. Allerdings endet diese Kompensationsfähigkeit, falls die Leistungsfähigkeit der Mechanik unter ein bestimmtes Mindestmaß abfällt. Deshalb ist es sehr interessant, die Modifizierbarkeit des Abfalls der kognitiven Mechanik zu untersuchen. Im Folgenden werden die zentralen Befunde dieses Forschungsbereichs zusammengefasst.

4.3.1 Erhöhung des durchschnittlichen kognitiven Leistungsniveaus im Zuge soziokultureller Veränderungen und seine Konsequenzen auf Bevölkerungsebene

Seit Anfang des 20. Jahrhunderts ist es mit Hilfe der Psychometrie möglich, intellektuelle Leistungen verlässlich zu messen. Über viele Länder hinweg wurden seither die Anwärter auf den Militärdienst regelmäßig auf ihre kognitiven Leistungen hin getestet. Beim Vergleich dieser Leistungen über historische Zeiten hinweg, stellte man fest, dass sich die durchschnittlichen kognitiven Leistungen der Rekruten sukzessive verbessert haben (FLYNN 1987). In einer der klassischen Längsschnittstudien der kognitiven Altersforschung konnte man zeigen, dass sich kognitive Leistungen im Verlauf von 50 Jahren soziokulturellen Wandels (1950–2000) um 1,5 Standardabweichungen erhöht haben (SCHAIK 1996). Als Haupttreiber dieser Verbesserung werden proteinreichere Ernährung, besonders während der frühen Entwicklungsphasen des Gehirns, die Ausdehnung und Verbesserung des Schulsystems sowie Veränderungen in der kognitiven Komplexität der Arbeitswelt und der Lebenswelt insgesamt diskutiert. Diese historischen Verbesserungen der kognitiven Leistungen konnten nicht nur für 20-jährige Rekruten, sondern auch für ältere Personen nachgewiesen werden. In der Berliner Altersstudie, die Personen jenseits des 70. Lebensjahrs untersuchte, zeigte sich beispielsweise, dass es auch in dieser Altersgruppe im Verlauf von 20 Jahren (1994–2014) zu einer Verbesserung von etwa 1 Standardabweichung kam. Einer neueren Studie zufolge schwächt sich dieser Zuwachs inzwischen in den Ländern ab, die bereits auf hohem durchschnittlichem kognitivem Niveau operieren. Allerdings konnte die Studie nicht entscheiden, ob diese Abflachung des Zuwachses auf ein Erreichen biologischer Grenzen zurückzuführen ist, ob es sich um eine Verlangsamung des Zuwachses handelt oder etwa der Tatsache geschuldet ist, dass Gesellschaften noch nicht so gut darin sind, die zweite Hälfte des Lebens im Sinne von Unterstützungssystemen zu optimieren, wie dies für die ersten dreißig Jahre der Fall ist (HESSEL et al. 2018). Dies wird die Zukunft zeigen, so sich Gesellschaften an die Tatsache des längeren Lebens anpassen.

Welche Auswirkungen hat diese von Generation zu Generation stattfindende Verbesserung des durchschnittlichen kognitiven Leistungsniveaus auf das Humanvermögen eines Landes, dessen Bevölkerung altert. Eine Studie ist dieser Frage am Beispiel Großbritanniens nachgegangen (SKIRBEKK et al. 2013). Die Ergebnisse zeigen, dass Großbritannien im Jahre 2040 zwar kalendarisch älter sein wird, allerdings, gemessen an der kognitiven Leistungsfähigkeit, kognitiv jünger. Dies ist möglich, weil der Anstieg des durchschnittlichen Leistungsniveaus den Abfall der kognitiven Leistung, der mit dem Alter beobachtet wird, mehr als ausgleicht und sogar noch übertrifft.

4.3.2 Verbesserung kognitiver Leistungen im Alter durch Training

Kognitive Leistungen im Alter lassen sich durch Trainingsmaßnahmen nachhaltig verbessern. Das hat die „in vitro“-kognitive Trainingsforschung seit den 1970er Jahren gezeigt. Die *Plastizität* der kognitiven Leistungsfähigkeit wurde in zahlreichen Trainingsuntersuchungen sowohl zu Leistungen in den üblichen Intelligenztestaufgaben als auch zu Gedächtnisleistungen bestätigt (zum Überblick vgl. HERTZOG et al. 2008). In diesen klassischen Trainingsstudien haben Teilnehmer entweder wiederholt kognitive Aufgaben gelöst oder erhielten auch Hinweise auf die besten Lösungsstrategien. Anhand von Längsschnittdaten lässt sich zeigen, dass das Ausmaß dieser Leistungssteigerung (1/2 bis 1 Standardabweichung) ungefähr dem in der Altersspanne von 60 bis 80 beobachteten Leistungsrückgang entspricht. Nach Abschluss des Trainings bleibt nicht der gesamte Zugewinn erhalten, es kommt zu einem graduellen Rückgang, aber es bleibt ein Zugewinn erhalten, und das Leistungsniveau lässt sich durch erneutes Training sehr schnell wieder erhöhen (WILLIS und NESSELROADE 1990). Allerdings sind diese Leistungsgewinne nicht so zu verstehen, dass die Interventionen zu einer Umkehrung des vorher stattgefundenen biologisch fundierten Abbaus in der Mechanik führen, vielmehr handelt es sich dabei hauptsächlich um den Erwerb von Strategien (d. h. Pragmatik), die es erlauben, den Abbau in der Mechanik auszugleichen oder zumindest abzumildern. Dies bedeutet auch, dass die Übertragbarkeit der Leistungszugewinne auf nicht trainierte Aufgaben sehr begrenzt ist und ohne die Anwendung der gelernten Strategie die bessere Leistung ausbleibt.

Anders ist das bei Interventionen, die die körperliche Ausdauerleistung von Personen steigern. Eine Reihe von Untersuchungen konnte zeigen, dass diese Erhöhung der Ausdauerfitness die kognitive Leistungsfähigkeit generell erhöht (PRAKASH et al. 2015). Mit Hilfe von neurophysiologischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Steigerung der körperlichen Ausdauerleistung in Gehirnarealen, die Altersabbau unterworfen sind, zu einer Reaktivierung im Sinne einer erhöhten Verarbeitungseffizienz führt (VOELCKER-REHAGE et al. 2011). Insofern hat die Erhöhung der kognitiven Leistungsfähigkeit, aufgrund erhöhter körperlicher Fitness, einen generalisierten Effekt auf die kognitiven Leistungen und ist auch nicht abhängig von der Anwendung erlernter Strategien. Aus Untersuchungen im Tier- und im Menschmodell konnte man zeigen, dass unter anderem verstärkte Gehirndurchblutung und dadurch unterstützte Angiogenese, verstärkte Synaptogenese und schließlich auch Neurogenese im Hippocampus (Dentate Girus) diesen Leistungseffekten zugrunde liegen (STAUDINGER 2015). Darüber hinaus spielen die Stimulierung des endokrinen Systems von Muskel (BDNF) und Knochen (Osteocalcin) eine wichtige Rolle (LEE et al. 2007).

Kognitives Training „in vivo“ findet beispielsweise im Beruf statt (oder eben auch nicht). Seit Jahrzehnten wird der Effekt der Komplexität von Arbeitsumwelten auf die kognitive Alterung untersucht, und es zeigen sich positive Effekte (SCHOOLER et al. 1999). Komplexität in der Arbeit ist allerdings nicht in allen Berufen vorhanden, deshalb hat man sich in letzter Zeit mit einem Teilaspekt von Komplexität beschäftigt – der Notwendigkeit, Neues zu verarbeiten. Die Verarbeitung von Neuem findet in fast jedem Beruf statt, wenn auch auf unterschiedlichen Komplexitätsniveaus. Eine quasi-experimentelle Untersuchung in der verarbeitenden Industrie hat gezeigt, dass Produktionsarbeiter, die sich während 16 Jahren mit mehr neuen Arbeitsaufgaben auseinandersetzen mussten (freiwillig oder unfreiwillig), bei gleicher Ausgangsleistung und auch gleicher Offenheit für neue Erfahrungen, am Ende bessere kognitive Leistungsfähigkeit und funktionalere Gehirnstruk-

turen hatten (OLTMANN et al. 2017). Kognitives Training *in vivo* kann auch in der nachberuflichen Phase beispielsweise durch bürgerschaftliches Engagement und/oder anspruchsvolle Hobbies seine Fortsetzung finden (STINE-MORROW et al. 2008). Untersuchungen zum Effekt freiwilligen Engagements in neuen Kontexten und mit neuen sozialen Partnern hat nachhaltige kognitive Gewinne gezeigt (CARLSON et al. 2008).

5. Was lässt sich aus diesen wissenschaftlichen Befunden für die Gestaltung einer Gesellschaft des längeren Lebens lernen?

Die Erhöhung der Erwerbsbeteiligung von Personen über 55 Jahren und über 65 ist unerlässlich. Dies ist – wie oben ausgeführt – inzwischen in Deutschland auch gelungen. Die Daten zur Gesundheitsentwicklung zeigen, dass die Erwerbsbeteiligung im Durchschnitt auch im höheren Alter möglich ist. Allerdings weisen die Befunde zur kognitiven Leistungsfähigkeit im Alter und ihrer Plastizität darauf hin, dass sowohl in der Arbeitswelt als auch im Bereich der nachberuflichen Tätigkeiten Anreize zur Beschäftigung mit neuen Informationen und Aufgaben gesetzt werden sollten und dass dies nicht erst mit 55 Jahren oder gar noch später, sondern während des gesamten Erwachsenenalters der Fall sein sollte. Abbildung 1 zeigt, wie ein solch neuer Lebensverlauf, der als „in vivo“-kognitives Training verstanden werden kann, aussehen könnte. Abwechslung und Vielfalt gibt dem Leben seine Würze (*variety is the spice of life*), sagt ein Sprichwort. Die Forschung zeigt, dass dies sehr wahr ist und sowohl kognitive Leistungen als auch die Motivation befördert. Lernen während des Erwachsenenalters und Alters ist eine wichtige Zutat, um solch

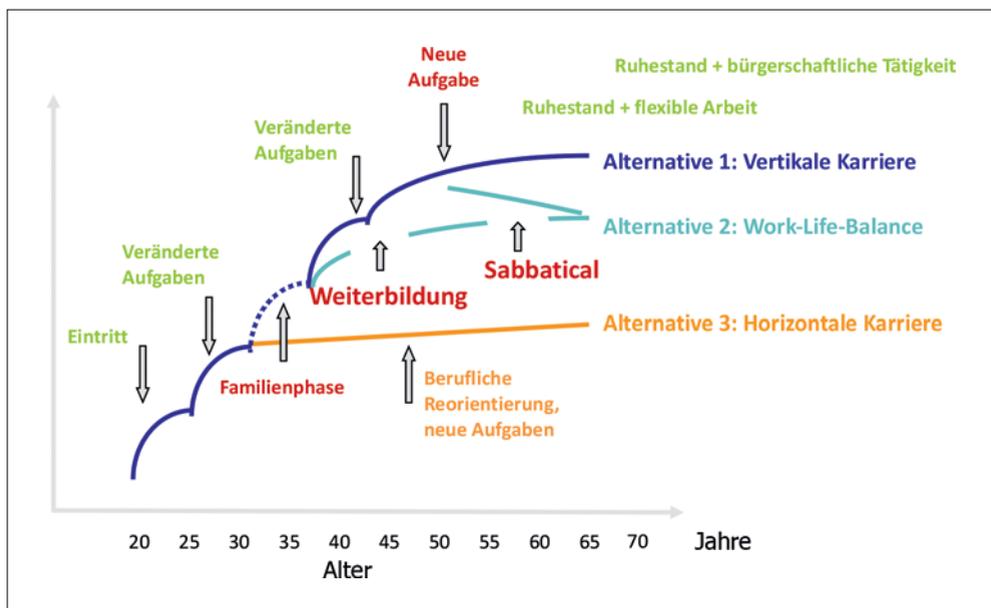


Abb. 1 Vielfalt und Abwechslung ist die Würze des Lebens: Neue Modelle des Lebensverlaufs, der Arbeitsbiographie, des Ruhestands und der Vereinbarkeit von Beruf und Familie (nach STAUDINGER und HEIDEMEIER 2009).

neue Tätigkeitsbiographien Realität werden zu lassen. Leider hat Deutschland hier noch mehr Nachholbedarf als bei der Arbeitsmarktteilnahme. Nur 40 % der 55–64-Jährigen in Deutschland geben an, dass sie im letzten Jahr an einer Weiterbildung teilgenommen haben. Wohingegen dies in Schweden fast 60 % sind (OECD 2017).

Aufgrund der Plastizität menschlichen Alterns liegt die Zukunft des Alterns, also wie es 2030, 2050 oder am Ende dieses Jahrhunderts aussehen wird, zu einem großen Anteil in den Händen jeder einzelnen Person, der Unternehmen und der gesellschaftlichen Strukturen. Für das Individuum ist es wichtig, die Tatsache des längeren Lebens wirklich auf sich selbst zu beziehen und die Lebensplanung entsprechend anzupassen, anstatt sich an den Bildern, die von Eltern und Großeltern im Kopf sind, zu orientieren. Dies schließt ein, dass die eigene Gesundheit und das Weiterlernen Investitionen jedes Einzelnen, neben solchen des Staates, verdienen.

In Unternehmen gilt es eine Kultur zu schaffen, die die Produktivität jeder Altersgruppe fördert und die Schwächen kompensiert. Arbeitsstrukturen sollten dafür sorgen, dass alle Mitarbeiter unabhängig vom Bildungsniveau Abwechslung und Neuigkeit in ihrer Tätigkeit erleben, und dass sie – falls nötig –, unabhängig vom Alter, mit Qualifizierungen darauf vorbereitet werden (BACKES-GELLNER und VEEN 2009). Es gehört auch dazu, dass das längere Fenster der Berufstätigkeit, mit Hilfe von Arbeitszeitkonten, immer wieder für bezahlte Auszeiten genutzt werden kann, was Motivation, Wohlbefinden und Gesundheit erhält.

Die Exekutive in einer erfolgreichen Gesellschaft des längeren Lebens priorisiert Gesundheit und Lernen für alle in jedem Alter. Ein Gesundheitssystem ist mehr als Therapie und mehr selbst als die Vermeidung von Krankheit (Prävention). Es sollte auch die Entwicklung von Gesundheitsressourcen beinhalten und belohnen (KOCHSIEK 2009). Bildung ist nicht nur während der ersten 20 bis 30 Lebensjahre eine Gemeinschaftsaufgabe (STAUDINGER und HEIDEMEIER 2009). Es gilt, gemeinschaftliche Bildungsaufgaben für das Erwachsenenalter und Alter zu definieren und mit Qualität umzusetzen. Lernen und Bildung im Erwachsenenalter kann nicht allein an den Beruf gebunden sein. In einer sich sehr schnell verändernden, technologiegetriebenen Gesellschaft gilt es zu vermeiden, dass die Wissensschere weiter aufgeht. Eine erfolgreiche Gesellschaft des längeren Lebens setzt weiterhin Anreize für bezahlte Arbeit in der nachberuflichen Phase. Sie schafft Raum für bürgerschaftliche Tätigkeiten sowie das Miteinander der Generationen auch außerhalb der Familie und unterstützt die Entwicklung vielfältiger Möglichkeiten des Wohnens im Alter (KOCKA et al. 2009). Schließlich gilt es, sich von einem einseitig negativen Altersbild zu verabschieden und die reichhaltigen Möglichkeiten der Lebensgestaltung in einem längeren Leben öffentlich zu diskutieren und zu veranschaulichen. In diesem Sinne verweist die moderne Altersforschung auf die Zukunft des Alterns.

Literatur

- Akademiengruppe Altern in Deutschland 2009: Gewonnene Jahre. Empfehlungen der Akademiengruppe Altern in Deutschland (Altern in Deutschland Bd. 9). Nova Acta Leopoldina N. F. 107 (2009)
- BACKES-GELLNER, U., und VEEN, S. (Hrsg.): Altern, Arbeit und Betrieb (Altern in Deutschland Bd. 3). Nova Acta Leopoldina N. F. 101 (2009)
- BALTES, P. B., LINDENBERGER, U., and STAUDINGER, U. M.: Lifespan theory in developmental psychology. In: LERNER, R. M. (Ed.): Handbook of Child Psychology; pp. 569–664. New York: Wiley 2006

- BÖRSCH-SUPAN, A., ERLINGHAGEN, M., HANK, K., JÜRGES, H., und WAGNER, G. G. (Hrsg.): Produktivität in alternenden Gesellschaften (Altern in Deutschland Bd. 4). Nova Acta Leopoldina N. F. 102 (2009)
- BUSSOLO, M., KOETTL, J., and SINNOTT, E.: Golden Aging: Prospects for Healthy, Active, and Prosperous Aging in Europe and Central Asia. Washington, DC: World Bank 2015
Retrieved from Washington, D. C.: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22018>
- CARLSON, M. C., SACZYNSKI, J. S., REBOK, G. W., SEEMAN, T., GLASS, T. A., MCGILL, S., TIELSCH, J., FRICK, K. D., HILL, J., and FRIED, L. P.: Exploring the effects of an “everyday activity” program on executive function and memory in older adults: Experience corps. *The Gerontologist* 48, 793–801 (2008)
- CHRISTENSEN, K., DOBLHAMMER, G., RAU, R., and VAUPEL, J. W.: Ageing populations: the challenges ahead. *Lancet* 374, 1196–1208 (2009)
- CRIMMINS, E. M., ZHANG, Y., and SAITO, Y.: Trends over 4 decades in disability-free life expectancy in the United States. *American Journal of Public Health* 106/7, 1287–1293 (2016)
- EHMER, J., und HÖFFE, O. (Hrsg.): Bilder des Alters im Wandel. Historische, interkulturelle, theoretische und aktuelle Perspektiven (Altern in Deutschland Bd. 1). Nova Acta Leopoldina N. F. 99 (2009)
- European Academies Network: Mastering Demographic Change in Europe*. National Academy of Sciences Leopoldina 2014
- FLYNN, J. R.: Massive IQ gains in 14 nations: What IQ tests really measure. *Psychological Bulletin* 101, 171–191 (1987)
- HERTZOG, C., KRAMER, A. F., WILSON, R. S., and LINDENBERGER, U.: Enrichment effects on adult cognitive development can the functional capacity of older adults be preserved and enhanced? *Psychological Science in the Public Interest* 9, 1–65 (2008)
- HESSEL, P., KINGE, J. M., SKIRBEKK, V., and STAUDINGER, U. M.: Trends and determinants of the Flynn effect in cognitive functioning among older individuals in 10 European countries. *Journal of Epidemiology and Community Health* (online first). doi:10.1136/jech-2017-209979 (2018)
- KOCHSIEK, K. (Hrsg.): Altern und Gesundheit (Altern in Deutschland Bd. 7). Nova Acta Leopoldina N. F. 105 (2009)
- KOCKA, J., KOHLI, M., und STREECK, W. (Hrsg.): Altern: Familie, Zivilgesellschaft, Politik (Altern in Deutschland Bd. 8). Nova Acta Leopoldina N. F. 106 (2009)
- LEE, N. K., SOWA, H., HINOI, E., FERRON, M., AHN, J. D., CONFAVREUX, C., DACQUIN, R., MEE, P. J., MCKEE, M. D., JUNG, D. Y., ZHANG, Z., KIM, J. K., MAUVAIS-JARVIS, F., DUCY, P., and KARSENTY, G.: Endocrine regulation of energy metabolism by the skeleton. *Cell* 130/3, 456–469 (2007)
- LEVY, B. R., SLADE, M. D., KUNKEL, S. R., and KASL, V.: Longevity increased by positive self-perceptions of aging. *Journal of Personality and Social Psychology* 83, 261–278 (2002)
- LUTZ, W., GOUJON, A., KC, S., STONAWSKI, M., and STILIANAKIS, N.: Demographic and Human Capital Scenarios for the 21st Century: 2018 Assessment for 201 Countries. JRC111148. Brussels: Publications Office of the European Union 2018
- MATTHEWS, F. E., ARTHUR, A., BARNES, L. E., BOND, J., JAGGER, C., ROBINSON, L., BRAYNE, C., and *Medical Research Council Cognitive Function and Ageing Collaboration*: A two-decade comparison of prevalence of dementia in individuals aged 65 years and older from three geographical areas of England: Results of the Cognitive Function and Ageing Study I and II. *Lancet* (London, England) 382/9902, 1405–1412 (2013)
- OECD: Education at a Glance 2017: OECD Indicators. Paris: OECD Publishing 2017
- OEPPE, J., und VAUPEL, J. W.: Broken limits to life expectancy. *Science* 296, 1029–1031 (2002)
- OLTMANN, J., GODDE, B., WINNEKE, A. H., RICHTER, G., NIEMANN, C., VOELCKER-REHAGE, C., SCHÖMANN, K., and STAUDINGER, U. M.: Don’t lose your brain at work – The role of recurrent novelty at work in cognitive and brain aging. *Frontiers in Psychology* 8/117, 1–16 (2017)
- PRAKASH, R. S., VOSS, M. W., ERICKSON, K. I., and KRAMER, A. F.: Physical activity and cognitive vitality. *Annual Review of Psychology* 66/1, 769–797 (2015)
- SATIZABAL, C. L., BEISER, A. S., CHOURAKI, V., CHÉNE, G., DUFOUIL, C., and SESHADRI, S.: Incidence of dementia over three decades in the Framingham Heart Study. *The New England Journal of Medicine* 374/6, 523–532 (2016)
- SCHAE, K. W.: Adult Intellectual Development: The Seattle Longitudinal Study. New York: Cambridge University Press 1996
- SCHOOLER, C., MULATU, M. S., und OATES, G.: The continuing effects of substantively complex work on the intellectual functioning of older workers. *Psychology and Aging* 14/3, 483–506 (1999)
- SCOTT, A.: The myth of an “ageing society”. *World Economic Forum* 2018
Retrieved from <https://www.weforum.org/agenda/2018/05/the-myth-of-the-ageing-society>
- SKIRBEKK, V., STONAWSKI, M., BONSSANG, E., und STAUDINGER, U. M.: The Flynn effect and population aging. *Intelligence* 41/3, 169–177 (2013)

- SKIRBEKK, V. F., STAUDINGER, U. M., and COHEN, J. E.: How to measure population aging? The answer is less than obvious: A review. *Gerontology* (online first). doi:10.1159/000494025 (2018)
- STAUDINGER, U. M.: Older and wiser? Integrating results on the relationship between age and wisdom-related performance. *International Journal of Behavioral Development* 23/3, 641–664 (1999)
- STAUDINGER, U. M.: Images of aging: Outside and inside perspectives. *Annual Review of Gerontology and Geriatrics* 35/1, 187–210 (2015)
- STAUDINGER, U. M., and HEIDEMEIER, H. (Hrsg.): Altern, Bildung und lebenslanges Lernen (Altern in Deutschland Bd. 2). *Nova Acta Leopoldina N. F. 100* (2009)
- STAUDINGER, U. M., MARSISKE, M., and BALTES, P. B.: Resilience and reserve capacity in later adulthood: Potentials and limits of development across the life span. In: CICHETTI, D., and COHEN, D. (Eds.): *Developmental Psychopathology*; pp. 801–847. New York: Wiley 1995
- STINE-MORROW, E. A. L., PARISI, J. M., MORROW, D. G., and PARK, D. C.: The effects of an engaged lifestyle on cognitive vitality: A field experiment. *Psychology and Aging* 23/4, 778–786 (2008)
- STOCK, G., BERTRAM, H., FÜRNKRANZ-PRSKAWETZ, A., HOLZGREVE, W., KOHLI, M., und STAUDINGER, U. M. (Hrsg.): *Zukunft mit Kindern. Fertilität und gesellschaftliche Entwicklung in Deutschland, Österreich und der Schweiz*. Frankfurt: Campus Verlag 2012
- UN DESA: *World Population Prospects: The 2017 Revision*. New York, NY, USA: United Nations Publications 2017
- VAUPEL, J. W.: Biodemography of human ageing. *Nature* 464, 536–542 (2010)
- VOELCKER-REHAGE, C., GODDE, B., and STAUDINGER, U. M.: Cardiovascular and coordination training differentially improve cognitive performance and neural processing in older adults. *Frontiers in Human Neuroscience* 5/26, 1–12 (2011), doi:10.3389/fnhum.2011.00026
- WHO: *World Report on Ageing and Health 2015*. Luxembourg: WHO Press 2015
- WILLIS, S. L., and NESSELROADE, C. S.: Long-term effects of fluid ability training in old-old age. *Developmental Psychology* 26, 905–910 (1990)
- WU, Y.-T., FRATIGLIONI, L., MATTHEWS, F. E., LOBO, A., BRETELER, M. M., SKOOG, I., and BRAYNE, C.: Dementia in western Europe: epidemiological evidence and implications for policy making. *The Lancet Neurology* 15/1, 116–124 (2016)

Prof. Dr. Ursula M. STAUDINGER
Robert N. Butler Columbia Aging Center
Columbia University
722 168th Street
New York, NY 10032
U.S.A.
Tel.: +1 212 3423757
E-Mail: umstaudinger@columbia.edu

Frühkindliche Sozialisation – Die Entwicklung kognitiver, sprachlicher und motivationaler Kompetenzen in Individuum und Gesellschaft

Frank RÖSLER ML (Hamburg)



Zusammenfassung

Kognitive, sprachliche und motivationale Kompetenzen entwickeln sich aus einer kontinuierlichen Interaktion zwischen genetischen Prädispositionen und Umweltbedingungen. Der Einfluss der Umwelt auf die Entwicklung beginnt bereits während der Schwangerschaft und ist in den ersten Lebensjahren von besonderer Bedeutung. Ungünstige Bedingungen, wie Stress der Mutter während der Schwangerschaft, Gewalt in der frühen Kindheit, reduzierte sprachliche und kognitive Stimulation, hinterlassen Spuren, die Gehirn- und Immunfunktionen über die gesamte Lebensspanne beeinträchtigen können. Die Neurobiologie hat solche Effekte in epigenetischen Modifikationen der Desoxyribonukleinsäure (DNS) verortet. In der frühen Kindheit gibt es sensible und kritische Zeitfenster, in denen Umwelteinflüsse von besonderer Bedeutung sind. In diesen Phasen tragen positive, unterstützende Umweltbedingungen besonders dazu bei, dass sich das volle Potential eines Individuums entwickelt bzw. dass negative, ungünstige Umweltbedingungen die neurokognitive Entwicklung besonders stark beeinträchtigen.

Der sozioökonomische Status (SES) einer Familie (definiert durch Bildung, Beruf und Einkommen der Eltern) korreliert eng mit der Entwicklung. Geringer SES geht mit ungünstigen Bedingungen einher, die den Stresslevel der Eltern und Kinder erhöhen und somit eine positiv-affektive und kognitiv stimulierende Erziehung beeinträchtigen. Diese ungünstigen Bedingungen beeinflussen die Entwicklung des Nerven- und des Immunsystems und haben unmittelbare Konsequenzen für die Entwicklung von Kognition, Emotion, Motivation und Gesundheit. Die Verletzlichkeit des sich entwickelnden Systems ist nach der Geburt besonders hoch. Daher ist es wichtig, dass nachteilige Umgebungen so früh wie möglich kompensiert werden, z. B. durch spezielle Mutter-Kind-Unterstützungsprogramme.

Kognitive und motivationale Kompetenzen sind die wichtigsten Voraussetzungen für den Lebenserfolg eines Individuums, definiert durch Bildungsniveau, Beruf, Einkommen und Gesundheitszustand im späteren Leben. Individuelle Kompetenzen können sich nur in vollem Umfang entfalten, wenn in der frühen Kindheit positive und unterstützende Lebensumstände herrschen und wenn genetisch bedingte Potentiale durch unterstützende und herausfordernde Erziehungsmethoden freigesetzt werden. Kompetenzen, die durch die intellektuelle Leistung und Selbstkontrolle aller Individuen einer Gesellschaft bereitgestellt werden, bestimmen das wirtschaftliche Wachstum und die Stabilität einer Gesellschaft. Eine nachhaltige Steigerung des Lebensstandards einer Gesellschaft hängt daher vor allem von den Bemühungen ab, die in Kinderbetreuung und Bildung investiert werden.

Abstract

Cognitive, linguistic, and motivational competences of an individual develop out of a continuous interaction between genetic predispositions and environmental conditions. Due to the high plasticity of the system, brain and behavior adapt to the specific genetically given and prevailing environmental conditions. The impact of the environment on development begins already during gestation and is of particular importance during the first years of life. Adverse conditions, as stress of the mother during pregnancy, experienced violence during early childhood, impaired language input or poor cognitive stimulation leave lifelong scars, which impair brain function, cognition, and health over the whole lifespan. Neurobiology has traced back such effects to epigenetic modifications of the deoxyribonucleic acid (DNA). There are sensitive and critical windows of opportunity in early childhood during which environmental input has particular power to modify the system. Positive, supportive environmental conditions can then boost genetic predispositions and help to set free the full potential of an individual, while negative, adverse environmental conditions will severely impair neurocognitive development.

Socio-economic status (SES) of a family (defined by education, occupation and income) has a high impact on a child's development. Poor SES results in a bunch of adverse conditions, which increase the stress level of both parents and children and thus reduce affectionate parenting, restrict cognitive stimulation, or provide poor role models. These adverse conditions affect the development of brain anatomy, brain function and of the immune system, and thus have immediate consequences for the development of cognition, emotion, motivation, and health. As the vulnerability of the developing system is high after birth and attenuates with increasing age, it is of particular importance that disadvantageous environments are prevented as early as possible, e. g. by special mother-child supporting programs.

Cognitive and motivational competences (in short: Brain Power) are the most important prerequisites for life success as defined by levels of education, occupation, income, and health status reached by an individual later in life. Individual brainpower can develop only to its full extent, if positive and supportive environments prevail in early childhood and if genetically given potentials are set free by supportive and challenging methods of education. Collective brainpower, which is provided by cognition and self-control of all individuals of a society, determines the standard of living of a society, its social stability and economic growth. From this follows that a sustainable raise of the standard of living of a society depends particularly on the efforts, which are invested into childcare and education.

Einleitung

Im Juni 2018 führte die Leopoldina zusammen mit der *Independent Group of Scientist* der Vereinten Nationen (*United Nations, UN*)¹ eine Tagung zum Thema *Brain Power for Sustainable Development*² durch. Ausgangspunkt war die Frage, wie individuelle und kollektive Kompetenzen überall auf der Welt so gefördert werden können, dass wir uns als Menschheit nicht ins Desaster, sondern in eine lebenswerte Zukunft bewegen.

Die Herausforderungen der Zukunft in unserer Welt sind gewaltig. Die UN hat zentrale Probleme und Ziele in ihrem Statement zu den *Sustainable Development Goals (SDGs)* zusammengefasst.³ Ob und wie diese Ziele in absehbarer Zeit erreicht werden können, hängt davon ab, wie sich Menschen verhalten und entscheiden werden. Und das wiederum hängt davon ab, was sie gelernt haben, was sie leisten, was sie vorhersehen und wie sie für die Zukunft planen können. Plakativ umschrieben: Es ist das, was Menschen „im Kopf haben“, ihre kognitiven, emotionalen und motivationalen Kompetenzen. *Brain Power* des Einzelnen, aber ebenso die kollektive *Brain Power* eines Staates entscheiden darüber, wie sich die Zukunft der Menschheit entwickeln wird.

Wie sich kognitive, emotionale und motivationale Potentiale eines jeden Menschen entfalten und damit zur kollektiven *Brain Power* beitragen können, hängt davon ab, wie und unter welchen Bedingungen Kinder aufwachsen. Die jeweilige Umwelt bestimmt, wie anlagebedingte Prädispositionen zum Ausdruck kommen, ob Potentiale geweckt und gefördert oder ob sie in ihrer Entwicklung eher behindert werden. Nur wenn sich die im Einzelnen schlummernden Ressourcen voll entwickeln können, stehen diese auch der Gesellschaft zur Verfügung. Das heißt, die erfolgreiche, entwicklungsadäquate Förderung der intellektuellen und emotionalen Fähigkeiten eines jeden Kindes ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die in einer Gesellschaft vorhandenen Potentiale verfügbar werden (siehe Abb. 1).

In der 2014 erschienenen Stellungnahme der Leopoldina (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2014*) haben 15 Wissenschaftler aus ganz unterschiedlichen Disziplinen die Frage behandelt, wie sich individuelle Leistungs- und Persönlichkeitsunterschiede entwickeln. Motivation dieser Arbeitsgruppe war die Beobachtung, dass in Öffentlichkeit und Politik viele Missverständnisse zu den Ursachen individueller Unterschiede und zur Entwicklung vorherrschen. In dem vorliegenden Beitrag sollen einige Punkte aus dieser Stellungnahme und aus der Tagung *Brain Power for Sustainable Development* präsentiert werden. Es wird gehen um

- das, was die *Brain Power* des Einzelnen ausmacht (Intelligenz und Selbstkontrolle),
- die Ursachen von Unterschieden zwischen Individuen (genetische Prädispositionen, Umwelteinflüsse und deren Interaktion),
- die Herausforderungen aversiver Umweltbedingungen und deren Auswirkungen auf Gehirn und Verhalten,
- sensible und kritische Phasen der Entwicklung, in denen Umwelteinflüsse besonders wirksam sind – im Positiven wie im Negativen,
- Konsequenzen für Bildungsinvestitionen.

1 Independent group of scientists: <https://www.un.org/press/en/2017/envdev1770.doc.htm>.

2 Brain Power for Sustainable Development: <https://www.leopoldina.org/veranstaltungen/veranstaltung/event/2561/>.

3 SDGs: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>.

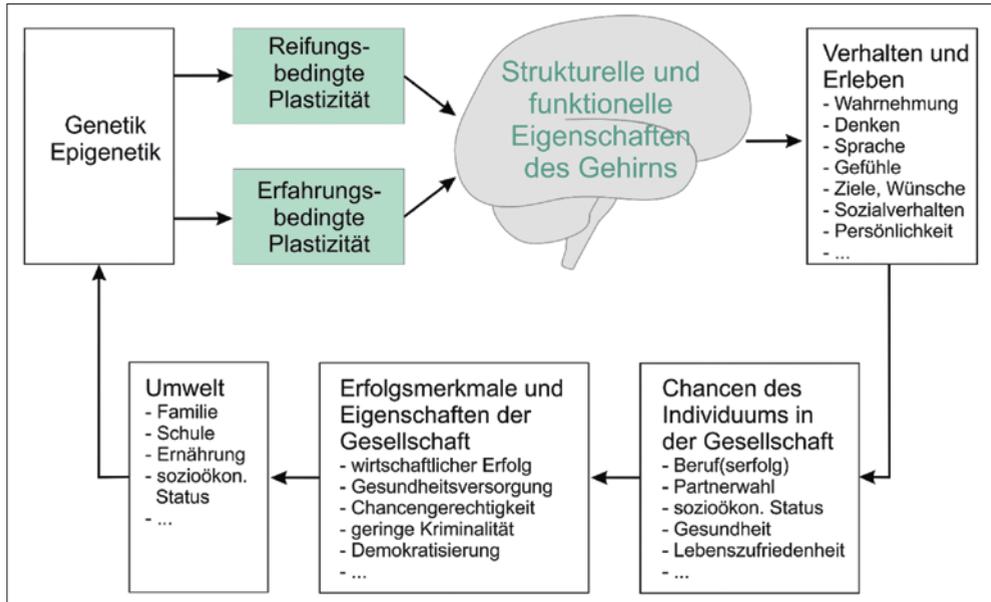


Abb. 1 Einflussfaktoren und Konsequenzen der Sozialisation. Strukturelle (Anatomie) und funktionale Eigenschaften des Gehirns (Physiologie) bestimmen das Verhalten und Erleben eines Menschen (Psychologie) (*oben rechts*). Dies drückt sich in der Wahrnehmung, der Sprache, dem Denken, in Gefühlen, in Zielen und Wünschen, im Sozialverhalten und in Persönlichkeitsmerkmalen aus. Die Eigenschaften des Gehirn-Geist-Systems entwickeln sich aufgrund zweier grundlegender Mechanismen. Zum einen durch reifungsbedingte, zum anderen durch erfahrungsbedingte funktionelle und strukturelle Veränderungen des Gehirns (neuronale Plastizität). Diese Formen der Plastizität hängen gleichermaßen von genetischen, epigenetischen und umweltbedingten Einflüssen ab (*oben links*). Die unteren Verbindungswege des Diagramms deuten an, wie das Verhalten des Einzelnen seine Chancen in der Gesellschaft bestimmt (*unten rechts*) und wie dadurch zugleich auch im Miteinander der Individuen die Eigenschaften einer gesamten Gesellschaft beeinflusst werden (*unten Mitte*). Diese Eigenschaften der Gesellschaft und Kultur bilden die Umwelt des Organismus und beeinflussen ihrerseits die reifungs- und die erfahrungsbedingte Plastizität (*oben links*). (© Frank RÖSLER, adaptiert von Abb. 1-1 aus *Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* 2014).

Persönlichkeitsmerkmale, die zur erfolgreichen Bewältigung der Lebensanforderungen beitragen

Komprimiert zusammengefasst sind es zwei Kompetenzen, die zur erfolgreichen Bewältigung der Lebensanforderungen beitragen: die Allgemeine Intelligenz und die Selbstregulation.

Allgemeine Intelligenz oder im Fachvokabular der Psychologie – Faktor G (*general intelligence*) – lässt sich objektiv und zuverlässig mit kulturunabhängigen Testverfahren messen (STERN und NEUBAUER 2013, NISBETT et al. 2012). Als zentrale Merkmale von G werden dabei die Spanne des Arbeitsgedächtnisses und die Fähigkeit zum deduktiven sowie induktiven Problemlösen erfasst. Allgemeine Intelligenz ist einer der validesten, wenn nicht der valideste Prädiktor für späteren „Lebenserfolg“. Zweifellos ist Lebenserfolg – Schulbildung, Beruf, Einkommen, Familie – von vielen Faktoren abhängig, aber, wenn man eine Vorhersage treffen möchte, wie wahrscheinlich ein positiver Lebenserfolg sein

wird, dann ist es die Allgemeine Intelligenz, die diese Vorhersage erlaubt, soweit dies überhaupt mit entsprechenden Fehlermargen möglich ist.

STRENZE (2007) hat dazu in einer Metaanalyse über hundert Studien ausgewertet, mit fast 200 000 Probanden. Die Analyse zeigt, dass die in der Kindheit mit objektiven Tests erfasste Allgemeine Intelligenz mit dem späteren Einkommen, dem Berufsstatus, dem Ausbildungsniveau, der Gesundheit und sogar einem verlangsamten altersbedingten Abbau kognitiver Fähigkeiten substantiell korreliert. Im Schnitt liegen diese Korrelationen zwischen 0,20 und 0,45 (wobei 0,00 bedeutet, dass kein Zusammenhang, 1,00, dass ein perfekter Zusammenhang besteht). Keine Frage, es handelt sich hierbei nicht um Eins-zu-eins-Relationen. Die Kenntnis der Allgemeinen Intelligenz lässt nur eine sehr grobe Vorhersage zu, denn es spielen eben auch immer viele andere Faktoren eine Rolle – mehr oder weniger glückliche Umstände –, aber all diese anderen Faktoren sind weniger gut objektiv und zuverlässig erfassbar und daher taugen sie nicht für eine zuverlässige Prädiktion.

Allgemeine Intelligenz ist der beste Prädiktor, aber es gibt einen zweiten, unabhängig von der allgemeinen Intelligenz, der ebenfalls mit späterem Lebenserfolg korreliert. Es ist dies die sogenannte Selbstregulation. Dieses Persönlichkeitsmerkmal steht zusammenfassend für Eigenschaften wie Emotionskontrolle, Anpassung des Verhaltens an Regeln, Kontrolle impulsiven Verhaltens und der Verzicht auf kurzfristige zu Gunsten langfristiger Gratifikationen (CASEY et al. 2011, KAROLY 1993). Auch dieses Merkmal lässt sich in der Kindheit objektiv erfassen. Walter MISCHEL war der Erste, der dies mit seiner Arbeitsgruppe gezeigt hat. Ein bekanntes Verfahren ist z. B. der „Marshmallow Test“. Das Kind muss sich entscheiden, ob es länger warten will, um eine größere Menge an Süßigkeiten zu bekommen (z. B. zwei Marshmallows), oder ob es lieber jetzt und gleich eine geringere Menge (ein Marshmallow) haben möchte (MISCHEL et al. 1989).

In einer großangelegten Langzeitstudie in Neuseeland wurden über 1000 Kinder getestet und in ihrem Lebensweg über jetzt mehr als 40 Jahre beobachtet. In dieser Studie wurde in der Kindheit auch das Ausmaß an Selbstregulation mit einer Reihe von objektiven und zuverlässigen Verfahren erfasst und mit Variablen im Erwachsenenalter in Beziehung gesetzt. Unter anderem zeigt sich (MOFFITT et al. 2011), dass ein höheres Maß an Selbstregulation in der Kindheit mit einem besseren Gesundheitsstatus und einer besseren finanziellen Situation im Erwachsenenalter einhergeht. Weitere Variablen, die auch bedeutsam mit dem Merkmal Selbstkontrolle korrelieren, sind die spätere soziale Integration und das Risiko, Straftaten zu begehen.

Um es noch einmal deutlich zu sagen: Beide Merkmale, in der Kindheit erfasst, sagen etwas über späteren Lebenserfolg aus, aber sie tun dies im Sinne einer statistischen Aussage für eine Population. Für das einzelne Individuum lassen sich daraus nur Wahrscheinlichkeitsaussagen ableiten.

Ursachen individueller Unterschiede

Die eben referierten Studien zeigen, dass sich Kinder in diesen beiden Variablen – Allgemeine Intelligenz und Selbstkontrolle – unterscheiden. Woher kommen diese Unterschiede?

Von alters her gibt es darauf zwei heiß umstrittene Thesen (LEWKOWICZ 2011): Die einen sagen, es ist die Anlage, das, was man bei der Geburt mitbekommen hat. Heute würde man sagen, es sind die Gene. Die anderen sagen, es ist die Umwelt, in die man

hineingeboren wurde – das, was man in der Erziehung erhalten und erlebt hat. Die eine These führt in der Regel zu Bildungspessimismus – „man kann eh nichts machen“ –, die andere zu übertriebenem Bildungsoptimismus – „jeder kann ein Einstein werden“.

Die Ergebnisse der modernen Neurowissenschaften, Biologie und Psychologie, zeigen, dass weder die eine noch die andere Position gerechtfertigt ist. Entwicklung und Sozialisation resultieren immer aus einer kontinuierlichen Interaktion von genetisch bedingten Anlagen und Umwelteinflüssen. In einem varianzanalytischen Modell ausgedrückt heißt dies, dass es keine Haupteffekte der Anlage oder der Umwelt gibt, sondern nur die Interaktion „Anlage * Umwelt“. Persönlichkeit ist immer eine Ko-Konstruktion aus genetischen Prädispositionen und umweltabhängigen Erfahrungen (BALTES et al. 2006).

Die kontinuierliche Ko-Konstruktion des sich entwickelnden Individuums beginnt in den ersten Tagen nach der Empfängnis und erstreckt sich über die gesamte Lebensspanne. Allerdings gelten dabei zwei Besonderheiten: *Erstens* gibt es einen zeitlichen Gradienten. Die Formbarkeit (Neuroplastizität) des Systems nimmt mit zunehmendem Alter ab, d. h., Umwelteinflüsse in höherem Alter hinterlassen weniger Spuren als in der sehr frühen Kindheit oder Jugend. Und *zweitens* gibt es Phasen, in denen bestimmte Umwelteinflüsse besonders wirksam sind, da sie dann auf ein System mit besonders ausgeprägter Neuroplastizität (Lernfähigkeit) treffen.⁴ Die Erfahrungen in solchen Phasen sind besonders bedeutsam, denn sie entscheiden mit darüber, ob sich ein Entwicklungspotential voll entfalten kann oder ob die Entwicklung eher beeinträchtigt werden wird (KNUDSEN 2004).

Prä- und postnatale Einflüsse

Die Ko-Konstruktion beginnt mit dem Beginn der Schwangerschaft, d. h., Umwelteinflüsse interagieren mit genetischen Prädispositionen bereits vor der Geburt und prägen den sich entwickelnden Organismus. Die Wirkungen lassen sich später, nach der Geburt im Kindesalter und zum Teil bis ins Erwachsenenalter sowohl in physiologischen als auch psychologischen Merkmalen beobachten.

Es mag überraschen, aber Neugeborene schreien in ihrer Muttersprache. Analysiert man die Melodie eines typischen Schreis eines deutschen und eines französischen Neugeborenen im Alter zwischen zwei und fünf Tagen, so zeigen sich markante Unterschiede (MAMPE et al. 2009). Die Frequenzkontur und der Intensitätsverlauf sind beim Schrei eines im deutschsprachigen Umfeld geborenen Säuglings fallend, beim Schrei eines im französischsprachigen Umfeld geborenen steigend. Diese Konturen folgen somit dem typischen Satzmelodieverlauf des Deutschen bzw. Französischen. Ungeborene Kinder hören ab dem 7. Schwangerschaftsmonat, und diese Höreindrücke prägen, wie diese Untersuchung nahelegt, bereits das Sprachverarbeitungssystem und die eigene Artikulation. Belege dafür gibt es auch aus anderen Studien, z. B. reagieren Neugeborene auf bereits bekannte, vor der Geburt gehörte Lautmuster anders als auf unbekannte Muster (GERVAIN und MEHLER 2010). In welcher Umwelt also die Mutter während der Schwangerschaft lebt, was es da *in utero* zu hören gibt, hinterlässt bereits Spuren bei den Nachkommen. Dies ist überraschend und theoretisch interessant. Der Befund belegt die immerwährende Interaktion von Anlage (hier die Fähigkeit, Sprache erwerben zu können) und Umwelt (hier die spezifischen Prosodiemerkmale).

4 Zu Belegen aus neurobiologischer Perspektive siehe u. a. HÜBENER und BONHOEFFER 2014.

Aber es ist nicht nur die Sprache, die bereits vorgeburtlich geprägt wird. Bedeutsamer für den weiteren Lebensweg sind andere vorgeburtliche Umwelteinflüsse, die zunächst besonders eindrucksvoll in exakt kontrollierten, tierexperimentellen Studien nachgewiesen werden konnten (BOCK et al. 2015). Werden z. B. trächtige Affenmütter in einer frühen oder späten Phase der Gravidität mit regelmäßigem Lärm belastigt, so wirkt sich diese Stressbelastung der Mutter auf die Entwicklung des Immunsystems der Nachkommen aus (COE et al. 2002). In dieser Untersuchung wurden bei den Nachkommen, als diese erwachsen waren, Blutproben genommen. Die Immunreaktionen wurde dann *in vitro* mit Lipopolysaccharid stimuliert, und es wurden die Zytokinantworten registriert. Bei den Nachkommen gestresster Mütter war die Immunantwort im Vergleich zu Kontrolltieren, die von nicht gestressten Müttern geboren worden waren, deutlich gedämpft, d. h., Tumornekrosefaktor-Alpha (TNF-alpha) und Interleukin-6 (IL-6) waren bei den Nachkommen der gestressten Mütter signifikant reduziert.

Auch die Einflüsse unmittelbar nach der Geburt, in den ersten Lebenswochen und Monaten sind besonders bedeutsam für die weitere Entwicklung. Die Art und Weise, wie Kinder in ihrer Kindheit behandelt werden, hat weitreichende Konsequenzen für ihr späteres Leben. Ein hierzu sehr aufschlussreiches Forschungsprogramm wurde von MEANEY und Kollegen initiiert. Rattenmütter unterscheiden sich darin, wie intensiv und liebevoll sie mit ihren Welpen umgehen. Es gibt Rattenmütter, die in den ersten Lebenstagen eine hohe Leck- und Pflegeaktivität zeigen, während andere eher das entgegengesetzte Verhaltensmuster aufweisen. Sie sind eher spröde im Umgang mit ihren Nachkommen. Durch systematische Variation der Einflussfaktoren und gekreuzte Aufzucht konnten MEANEY und Kollegen nachweisen, dass das Ausmaß taktilen Kontakts, den die Welpen in den ersten zwei Lebenswochen erhalten, einen direkten Einfluss auf die Expression des Glucocorticoid-Rezeptors (GR) im Hippocampus hat (ZHANG und MEANEY 2010). Bei jenen Welpen, die wenig taktilen Kontakt erfahren hatten, war der GR herunterreguliert, während er bei denjenigen mit hohem taktilen Kontakt hochreguliert war. Dies hat unmittelbare und dauerhafte physiologische und verhaltensbedingte Konsequenzen: Eine epigenetische Blockade der GR-Expression führt zu einer höheren Stressantwort mit einem höheren Corticosteroid-Basiswert, einer reduzierten negativen Rückkopplung auf den Cortico-Releasing-Faktor (CRF) und einem höheren Grad an Angst, gemessen im *Open-Field*-Test. Und diese Tiere verhielten sich später wie die Mütter, von denen sie aufgezogen wurden, d. h., sie zeigten ebenfalls weniger taktilen Kontakt. Bei der anderen Gruppe mit einer nicht blockierten GR-Expression gingen alle Variablen in die entgegengesetzte Richtung, Herunterregulierung des Corticosteroidspiegels, Hochregulation der negativen CRF-Rückkopplung, Reduktion der Angst und später mehr taktiler Kontakt. In weiteren Studien konnte gezeigt werden, dass dieses Verhalten der Mutter auch das spätere räumliche Lern- und Orientierungsverhalten der Nachkommen beeinflusst (LIU et al. 2000). Plakativ ausgedrückt: „mütterliche Zuneigung“ hat eine dauerhafte Auswirkung auf die Genexpression und die „Persönlichkeit“ der Nachkommenschaft.

Auch wenn man hinsichtlich der Generalisierbarkeit von tierexperimentellen Befunden auf den Humanbereich vorsichtig sein muss, so ist doch zunächst festzuhalten, dass diese Untersuchungen klare Zusammenhänge zwischen spezifischen Umweltfaktoren (Belastungen, mütterliches Pflegeverhalten) und Maßen der Gehirn- und Verhaltensentwicklung aufzeigen. Solche Zusammenhänge könnten in Studien mit Menschen, allein aufgrund ethischer Grenzen, niemals so untersucht werden. Die tierexperimentellen Studien liefern aber

über die korrelativen Befunde hinausgehende Erkenntnisse. Mit molekularbiologischen Analysen konnte zudem der vermittelnde Mechanismus aufgedeckt werden, wie sich psychologisch definierte Variablen (z. B. Stressbelastung, Zuneigung) auf die Physiologie eines Organismus dauerhaft auswirken können. Die Verhaltensbeeinflussungen bewirken physiologische Veränderungen, die dann ihrerseits Änderungen des Epigenoms auslösen. Diese epigenetischen Effekte regulieren, ob bestimmte Gene aufgrund von Umwelteinflüssen wirksam werden oder nicht (CREMER 2010). Und eine epigenetische Veränderung, die während der pränatalen oder frühen postnatalen Entwicklung induziert wurde, kann dann über die gesamte Lebensspanne wirksam bleiben.

Tierversuche können durch korrelative Humanstudien ergänzt werden. Das heißt, man kann schauen, wie bestimmte Umgebungen – günstige oder ungünstige – mit der Entwicklung des Gehirns und des Verhaltens kovariieren. So hat man z. B. retrospektiv die Belastung von Müttern während der Schwangerschaft erhoben und einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Ausmaß erlebter Gewalt gegen die Mutter während der Schwangerschaft und Veränderungen bei den Kindern im späten Jugendalter hinsichtlich deren Stress- und Immunreaktionen und entsprechenden epigenetischen Mutationen nachweisen können (RADTKE et al. 2011).

Ungünstige Umwelten

Welche Merkmale im Einzelnen zu einem eher positiven oder negativen Entwicklungsverlauf beitragen, ist angesichts der großen Vielfalt von Einflüssen schwierig einzugrenzen. Allerdings gibt es Lebensbedingungen, die in ihrer Summe eher belastend oder entlastend auf Eltern und Kinder wirken und die daher möglicherweise besonders bedeutsam für die Entwicklung sind. In zahlreichen Untersuchungen hat man signifikante Korrelationen zwischen dem sozioökonomischen Status der Familie, in der ein Kind aufwächst, und Maßen der Gehirn- und Verhaltensentwicklung gefunden. Sozioökonomischer Status (SES, engl. *socio economic status*) ist zweifellos ein sehr globales, multidimensionales Konzept, das viele unterstützende oder nachteilige Bedingungen des elterlichen und des umgebenden sozialen Umfelds einschließt. Alle diese Bedingungen bestimmen das Ausmaß an Belastungen oder Stress von Eltern und Kindern. Niedriger SES steht oft für begrenzte Wohnmöglichkeiten, für eine Stadtteilnachbarschaft mit dichter Bevölkerung, Gewalt und Straßenkriminalität, längeren Pendlerzeiten für Eltern und Kinder. Familien mit geringem SES (ausgedrückt z. B. in geringem Einkommen oder geringem Bildungsstand der Eltern) leiden häufiger unter wirtschaftlichen Schwierigkeiten, für die Kinder gibt es weniger fördernde Angebote, es kommt häufiger zu Konflikten zwischen den Partnern/Eltern, und dies führt häufiger zu gestörten sozialen Beziehungen innerhalb einer Familie. Auch wenn nicht immer alle negativen Bedingungen zusammenkommen müssen, so ist doch davon auszugehen, dass im Falle von niedrigem SES Kinder häufiger einem höheren Niveau von Belastungen ausgesetzt sind.

Physiologische und psychologische Überlastung im Sinne von länger anhaltenden, vermehrten Ängsten, Aggressionen und Erkrankungen beeinflusst die physiologische und psychologische Entwicklung eines Kindes. Diese Einflüsse lassen sich in vielen Merkmalen der Gehirnentwicklung nachweisen. Das Gehirn durchläuft von der Geburt bis zur Adoleszenz massive Veränderungen. Bei der Geburt sind zwar bereits alle anatomischen

Strukturen vorhanden, aber ihre Größe und ihre Mikrostruktur entfaltet sich erst in der Interaktion mit der Umwelt nach der Geburt.

In den ersten zwei Lebensjahren verändert sich in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen die dendritische Vernetzung der Zellen in der Großhirnrinde. Verbindungen, die viel genutzt werden, werden gestärkt – d. h., es bilden sich mehr synaptische Kontakte heraus –, während nicht genutzte Verbindungen eliminiert werden – d. h., die nicht genutzten Zellen sterben ab (*Apoptose*), und Synapsen werden ausgedünnt. Zugleich nimmt die Myelinisierung von Nervenzellen zu – d. h. die Isolierung durch Markscheiden. Diese mikroanatomischen Veränderungen lassen sich auch in makroanatomischen Veränderungen des Gehirns erkennen, z. B. in der Menge der grauen Substanz, der Menge der weißen Substanz, der kortikalen Dicke, der Kortexoberfläche sowie der gerichteten Verknüpfung der Neurone (*fraktionale Anisotropie*). Diese Veränderungen sind in den ersten zwei Lebensjahren besonders ausgeprägt, sie dauern aber bis in das späte Kindesalter an und sind letztlich erst mit dem Ende der Pubertät abgeschlossen. Die Trajektorien für die einzelnen Merkmale, also der Verlauf von Zu- und Abnahme über die Zeit, sind für einzelne Individuen unterschiedlich und – das ist ein ganz entscheidender Punkt – der Verlauf wird durch Umweltfaktoren, u. a. SES beeinflusst (NOBLE et al. 2015).

Wertet man z. B. aus, wie sich das Volumen einzelner Hirngebiete zwischen dem 4. und dem 18. Lebensjahr verändert, so zeigen sich unterschiedliche Trajektorien für Gruppen von Kindern aus Familien mit unterschiedlichem Sozialstatus. Der linke inferiore frontale Gyrus (IFG), eine Region, die stark an exekutiven Funktionen und der Sprachverarbeitung beteiligt ist, und der linke superiore Gyrus temporalis, der funktional mit Sprachfunktionen und der langfristigen Speicherung von Weltwissen verbunden ist, nehmen im Volumen bei Kindern mit hohem SES über die beobachtete Zeitspanne zu, für Kinder mit niedrigem SES dagegen ab. Es ist ein korrelativer Zusammenhang für den eine kausale Erklärung zunächst fehlt, denn viele Einflüsse sind denkbar. Die Unterschiede könnten z. B. darauf zurückzuführen sein, dass es in Familien mit niedrigem und hohem SES unterschiedlich viel kognitive Stimulation gibt, insbesondere im Bereich des Spracherwerbs, und dass somit das Gehirn weniger oder mehr durch kognitive Anforderungen gefordert oder trainiert wird. Es könnte aber durchaus auch sein, dass die genetischen Prädispositionen in den gegeneinander abgegrenzten Gruppen unterschiedlich sind und somit als Drittvariable sowohl die Hirnentwicklung der Kinder als auch den SES der Eltern beeinflussen.

Bemerkenswert ist, dass die für die Hirnentwicklung beschriebenen Trajektorien – Zunahme von Hirnvolumen in sprachrelevanten Arealen bei hohem SES, Abnahme bei geringem SES – eine hohe Übereinstimmung mit den Entwicklungspfaden der Allgemeinen Intelligenz aufweisen. VON STUMM und PLOMIN (2015) modellierten Daten von etwa 15 000 Kindern mit einem Wachstumsmodell. Diese Kinder wurden in einer großen Zwillingsstudie (*The Twins Early Developmental Study*) rekrutiert und waren zwischen dem zweiten und 16. Lebensjahr neunmal mit standardisierten Intelligenztests untersucht worden. Die Stichprobe wurde nach Maßen des Sozialstatus der Familie aufgeteilt (Bildung, Beruf und Einkommen der Eltern). Aus der Analyse wird deutlich, dass die Kinder aus Familien mit hohem SES zunehmend gewinnen (ihr IQ nimmt über die Beobachtungszeit also zu), die mit niedrigem SES dagegen zunehmend verlieren (ihr IQ nimmt ab). In dem einen Fall werden Potentiale also gefördert, in dem anderen eher blockiert, und diese unterschiedlichen Einflüsse bilden sich einerseits in hirnanatomischen, andererseits in verhaltensbezogenen Merkmalen ab.

Wie schon erwähnt, all das sind korrelative Zusammenhänge, die keine eindeutigen Folgerungen über Ursachen und Wirkungen erlauben. Kausalaussagen lassen sich daraus bestenfalls als Hypothesen formulieren. Allerdings gibt es quasiexperimentelle Feldstudien, aus denen sich etwas stringenter Aussagen ableiten lassen. ZIOL-GUEST und Kollegen (ZIOL-GUEST et al. 2012) untersuchten, wie sich eine Veränderung des Familieneinkommens in der Kindheit auf verschiedene, im Erwachsenenalter erfasste Variablen auswirkt. Die Veränderung des Familieneinkommens ist zwar keine vollkommen kontrollierte Intervention, aber man kann davon ausgehen, dass ein höheres Familieneinkommen eine Reihe der oben genannten negativen Einflüsse eines geringen SES abmildern kann. Die Daten wurden retrospektiv durch Befragung der Probanden im Erwachsenenalter erhoben und zugleich wurde abgefragt, wie häufig die Probanden im Alter zwischen 31 und 40 Jahren an bestimmten Krankheiten litten (Bluthochdruck, Arthritis), wie hoch ihr gegenwärtiges Einkommen war und wie häufig sie aufgrund von Krankheit und anderen Bedingungen nicht arbeitsfähig gewesen waren. Für diese Variablen wurde analysiert, welchen Einfluss der Zeitpunkt hatte, zu dem in der Kindheit eine Steigerung des Familieneinkommens eingetreten war. Wenn diese Steigerung früh erfolgte – bis zum Alter von 5 Jahren – dann gab es positive Effekte, im Sinne von weniger Erkrankungen und höheres Einkommen. War die Steigerung des Familieneinkommens später in der Kindheit eingetreten, so lagen keine bedeutsamen Effekte bezüglich der abhängigen Variablen vor. Eine Steigerung des Familieneinkommens in frühen Phasen der Kindheit (pränatal bis zum 5. Lebensjahr) wirkte sich also positiv aus. Steigerungen in späteren Phasen der Kindheit (zwischen 6. und 15. Lebensjahr) hatten kaum eine Auswirkung auf die Gesundheit, das Einkommen und die Arbeitsfähigkeit der im Erwachsenenalter befragten Probanden. Auch hier sind Kausalaussagen nur mit großer Vorsicht möglich, aber dennoch deutet die Studie darauf hin, dass frühe Umwelteinflüsse bedeutsamer sind als späte.

Sensible und kritische Phasen

Frühe Einflüsse sind bedeutsamer als späte! – Diese Aussage gilt letztlich für alle Funktionen, die sich im Laufe der Entwicklung herausbilden, für elementare Wahrnehmungsleistungen (Gesichter- oder Objekterkennung) ebenso wie für exekutive Leistungen (Selbstkontrolle). Der Grund hierfür ist nicht nur die Tatsache, dass die entwicklungsbedingte Plastizität im Laufe der Zeit für verschiedene Hirnregionen (~ Funktionen) abnimmt. Darüber hinaus gibt es sensible und kritische Phasen der Entwicklung, während derer der Organismus für Umwelteinflüsse besonders empfänglich ist (sensible Phasen) bzw. während derer bestimmte Umwelterfahrungen zwingend gemacht werden müssen, damit sich genetische Prädispositionen überhaupt voll entfalten können (kritische Phasen) (KNUDSEN 2004). Werden z. B. Katzen in den ersten Lebenswochen entweder in eine quer- oder längsgestreiften Umwelt aufgezogen, so entwickeln sich die für die Kontur- und Objektwahrnehmung bedeutsamen Schaltkreise in der Sehrinde („rezeptive Felder“) unterschiedlich. Je nach Umwelt bilden sich mehr oder weniger Schaltkreise für die Verarbeitung horizontaler oder vertikaler Konturen heraus, und diese unterschiedliche Hirnentwicklung hat dann deutliche Konsequenzen für die koordinierte Fortbewegung (BLAKEMORE und COOPER 1970). Zudem bleiben diese einmal etablierten neuroanatomischen Strukturen ein Leben lang bestehen (ESPINOSA und STRYKER 2012).

Dass die Ko-Konstruktion neuronaler Strukturen und Funktionen an bestimmte kritische Phasen gekoppelt ist, haben auch zahlreiche Studien gezeigt, in denen Kinder mit frühkindlichem Katarakt nach einer Operation die volle Sehfähigkeit erlangt haben. Die funktionelle Blindheit dieser Kinder in den ersten Lebensmonaten (gegebenenfalls Lebensjahren) hat lebenslange Nachwirkungen, nicht nur hinsichtlich einiger Leistungen der visuellen Wahrnehmung, sondern auch hinsichtlich multisensorischer Leistungen. Zum Beispiel gelingt es ehemaligen Kataraktkindern im Erwachsenenalter bei voller Sehfähigkeit weniger gut, Details von Gesichtern zu unterscheiden (LE GRAND et al. 2001) bzw. audiovisuelle Signale beim Lippenlesen zu integrieren (PUTZAR et al. 2007)

Besonders eindrucksvoll zeigt sich die Bedeutung sensibler bzw. kritischer Phasen im Bereich des Spracherwerbs. Eine Sprache so zu erlernen, dass man sie beherrscht wie die Muttersprache, ist nur etwa bis zum Ende des 6. Lebensjahres möglich. Natürlich können auch danach und selbst im Erwachsenenalter noch neue Sprachen erlernt werden, aber das Erlernen ist dann aufwendiger, subjektiv anstrengender und im Ergebnis weniger perfekt als der Erwerb der einen bzw. bei bilingualer Umgebung der zwei Erstsprachen.

Die früh erlernte Muttersprache ist in unserem Gehirn mehr oder weniger fest „verdrahtet“. Das Training dafür beginnt, wie schon erwähnt, vor der Geburt und endet etwa mit dem Ende des 6. Lebensjahres. Auch wenn Menschen später eine sehr lange Zeit in einer nicht-muttersprachlichen Umgebung verbringen, in dieser Nichtmuttersprache täglich reden und schreiben, werden sie nie die gleiche Kompetenz in dieser sekundären Sprache erreichen wie in ihrer Muttersprache. Dies betrifft insbesondere strukturelle Aspekte der Sprache wie Phonetik und Syntax. Eine sehr instruktive Studie dazu wurde von WEBER-FOX und NEVILLE veröffentlicht (WEBER-FOX und NEVILLE 1996). Sie untersuchten die Nachkommen chinesischer Einwanderer im Erwachsenenalter, als diese studierten bzw. sogar schon einen akademischen Grad erworben hatten. Diese jungen Erwachsenen waren in unterschiedlichem Alter in die amerikanische Sprachumgebung gekommen, entweder zwischen 1 und 3, 4 und 6, 7 und 10, 11 und 13 Jahren oder als sie älter als 16 Jahre gewesen waren. In den Tests zum grammatischen Verständnis zeigte sich ein zunehmendes Defizit für komplexe grammatikalische Konstruktionen, je später die Kinder mit der Zweitsprache in Kontakt gekommen waren. Ein Unterschied zu Muttersprachlern war schon für diejenigen zu beobachten, die zwischen dem 4. und 6. Lebensjahr eingewandert waren. Für die Semantik, also das Wortwissen und das Vokabular, galt dies nicht. Da zeigten sich Defizite nur für diejenigen, die bei der Einwanderung älter als 16 Jahre gewesen waren. Die strukturellen Aspekte einer Muttersprache (Phonetik, Syntax) scheinen sich somit in den ersten 4 bis 6 Lebensjahren zu etablieren, und sie tun dies nur, wenn bis dahin hinreichender und adäquater Sprachinput erfolgt. Erfahren Kinder, z. B. weil sie taub geboren wurden, in den ersten Lebensjahren keinerlei Sprachinput (also auch keine Gebärdensprache), so haben sie während ihres gesamten weiteren Lebens Defizite in der Beherrschung einer dann später erworbenen Sprache (MAYBERRY et al. 2002).

Es ist bemerkenswert, dass parallel zum Erwerb der Muttersprache ausgeprägte strukturelle Veränderungen im sich entwickelnden Gehirn stattfinden. Es gibt mehrere Faserverbindungen zwischen den hinteren und vorderen Regionen des Gehirns, die funktional mit dem Verstehen und der Produktion von Sprache verbunden sind (FRIEDERICI 2011). Einer dieser Tracti entwickelt sich in den ersten sechs Lebensjahren und ist funktional eng mit dem syntaktischen Spracherwerb verknüpft (BRAUER et al. 2013). Solange dieser Tractus nicht voll entwickelt ist, wird ein Kind bestimmte Satzkonstruktionen nicht richtig unter-

scheiden, z. B. aktive versus passive Formulierungen („der Hund jagt die Katze“ versus „der Hund wird von der Katze gejagt“) oder Subjekt- und Objektrelativsätze („Es ist der Junge, der das Mädchen ärgert“ versus „Es ist der Junge, den das Mädchen ärgert“). Der Befund zeigt, dass das kritische Fenster, in dem die Grammatik der Muttersprache voll erworben wird, mit biologischen Veränderungen der Verbindungen einzelner Gehirnregionen zusammenhängt.

Diese Reifungsprozesse verschiedener Funktionen und Hirnregionen als Resultat der Interaktion von Anlage und Umwelt haben unterschiedliche zeitliche Trajektorien. Die sensorischen und motorischen Kortizes sind die ersten, die sich vollständig entwickeln. Wesentliche Reifungsprozesse werden alle im ersten Jahr nach der Geburt abgeschlossen. Als nächstes reifen, hauptsächlich zwischen dem 1. und 4. Jahr nach der Geburt, die temporalen und parietalen Kortexbereiche. Schließlich beenden die präfrontalen Kortizes ihre Reifung bis zum Ende der Pubertät. Die jeweiligen Reifungsgipfel indizieren unterschiedliche sensitive bzw. kritische Entwicklungsphasen (CASEY et al. 2005, GILMORE et al. 2018).

Die physiologischen und anatomischen Veränderungen gehen einher mit der Entwicklung verschiedener perzeptueller, kognitiver und emotionaler Kompetenzen. Die Entwicklung der sensorisch-motorischen Hirngebiete kovariiert mit der Herausbildung und dem Erwerb von grundlegenden sensorischen Diskriminationsleistungen, motorischen Fertigkeiten sowie einer Feinabstimmung der unisensorischen Wahrnehmungssysteme aufeinander, so dass multisensorische Integration möglich wird. Die Entwicklung der parietalen und temporalen Kortizes korreliert mit dem Erwerb der Muttersprache und weiteren kognitiven Fähigkeiten, z. B. der räumlichen Orientierung oder dem kumulativen Erwerb von Weltwissen. Und schließlich geht die Entwicklung der präfrontalen Strukturen einher mit der Entwicklung sogenannter exekutiver Funktionen und der Selbstkontrolle (der Fähigkeit zur Verhaltenskontrolle, der Kompetenz, Emotionen und Motivationen zu beherrschen).

In den Phasen erhöhter neuronaler Plastizität wirken sich nicht nur fördernde Umwelteinflüsse besonders stark auf die Entwicklung aus. Für negative Umwelteinflüsse (z. B. Überbelastungen, Stress) gilt das entsprechende. Das heißt, der schädliche Einfluss aversiver Umweltbedingungen ist in den Phasen erhöhter Neuroplastizität ebenfalls wirksamer als in anderen Phasen (BELSKY et al. 2007). Schädigende Umwelterfahrungen, z. B. das Erleben von Gewalt und Missbrauch, scheinen zudem in unterschiedlichen Entwicklungsphasen unterschiedliche Hirnstrukturen mehr oder weniger stark zu affizieren (ANDERSEN und TEICHER 2008, TEICHER et al. 2016). Diese Auswirkungen auf unterschiedliche Hirnbereiche im Kindes- und Jugendalter, die die Entwicklung der Mikroanatomie des Gehirns betreffen, können sich dann im Erwachsenenalter in unterschiedlichen Funktionsbereichen äußern (in Form kognitiver, emotionaler oder psychopathologischer Auffälligkeiten).

Konsequenzen

Da sich die neuronale Plastizität im Verlauf des Kindes- und Jugendalters allmählich verringert und da sich zudem kritische Fenster zu bestimmten Zeitpunkten schließen, müssen unterstützende Interventionen so früh wie möglich begonnen werden. HECKMAN (2006) verwies darauf mit einer häufig zitierten, wenn auch nicht unumstrittenen Grafik. In dieser Grafik skizzierte er den vermuteten Zusammenhang zwischen den Erträgen von Investitio-

nen in Humankapital (d. h. vor allem elterliche Fürsorge und Schulbildung) mit dem Alter der Betroffenen. Funktional ist dafür ein exponentiell fallender Verlauf anzunehmen, d. h. je früher eine Bildungsinvestition gemacht wird, umso größer sind die Erträge für das Individuum sowie für die jeweilige Volkswirtschaft. Anders ausgedrückt: Günstige und förderliche Umwelten verlieren mit zunehmendem Alter an Wirksamkeit. Die Verbesserung der Lebensbedingungen zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung hat deutlich positivere Auswirkungen auf eine Biographie als spätere Interventionen. Dies liegt nicht zuletzt auch daran, dass Kompetenzen selbstverstärkend sind, d. h., früh erworbene Kompetenzen erleichtern den Erwerb weiterer Kompetenzen.

Daraus darf und sollte natürlich nicht abgeleitet werden, dass Bildungsinvestitionen nur in die frühe und früheste Kindheit gesteckt werden sollten. Dagegen sprechen mehrere Punkte: (1.) In die Kindheit passt nicht alles, was man lernen muss, hinein. So wünschenswert es auch wäre, mit muttersprachlicher Flüssigkeit zwei, drei oder vier Sprachen zu erwerben, es scheitert an zeitlichen Begrenzungen. Es gilt nicht nur, dass muttersprachliche Kompetenzen allein bis zum Ende des 6. Lebensjahres erworben werden, es gilt auch, dass dazu eine hinreichende Menge an Sprachinput gegeben sein muss. Bei mehr als drei Sprachen ist dies nicht mehr der Fall. Zeitintensives Lernen in einem Bereich reduziert zwangsläufig das Potential für ein zeitintensives Lernen in anderen Bereichen. (2.) Ein Individuum kann häufig bestimmte Dinge erst dann erlernen, wenn es zunächst andere, grundlegende Kompetenzen erworben hat. Die Integralrechnung setzt Kenntnisse der elementaren Algebra voraus, und entsprechendes gilt für viele andere Fertigkeiten. Man muss erst Lesen, Schreiben und Rechnen erlernen, ehe man mit dem Programmieren beginnen kann. (3.) Wie skizziert, sind die Möglichkeiten zum Erwerb bestimmter Kompetenzen von der Entwicklung bestimmter Hirnstrukturen abhängig, d. h., ein Training kann für bestimmte Kompetenzen erst dann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn die neuroanatomischen Voraussetzungen gegeben sind (Selbstkontrolle z. B. hängt mit der Entwicklung des präfrontalen Kortex zusammen, und diese Entwicklung beginnt und endet später als etwa die Entwicklung sensomotorischer Areale und Funktionen). (4.) Schließlich können und müssen auch Menschen nach der Pubertät noch lernen. Sekundäre und tertiäre Bildung müssen daher genauso gefördert werden wie die primäre Bildung.

Was die Heckman-Grafik aber suggestiv und korrekt verdeutlicht, ist, dass die frühen Bildungsinvestitionen die wichtigsten sind, denn sie schaffen die Voraussetzungen für den Erfolg aller späteren Maßnahmen.⁵ Gleichmaßen gilt, quasi als die andere Seite der Medaille, dass es besonders wichtig ist, aversive Umwelteinflüsse in der frühesten Kindheit zu verhindern, da dann ihre schädlichen Auswirkungen am nachhaltigsten sind (PAKULAK et al. 2018). Dementsprechend sollten auch Programme zur Unterstützung von Kindern aus sozial prekären Verhältnissen so früh wie möglich einsetzen, denn nur dann ist mit nachhaltigen und für das Individuum wie für die Volkswirtschaft bedeutsamen Effekten zu rechnen (BARNETT 2011, SCHOBER und SPIESS 2013).

Wie sich das einzelne Individuum entwickelt, wie gut oder schlecht sich dessen *Brain Power* herausbilden kann, hat unmittelbare Folgen für die Gesellschaft als Ganzes. HANUSHEK und WOESSMANN (2016) analysierten den Zusammenhang zwischen Schulbildung und Wachstumsrate für Entwicklungs- und Schwellenländer. Ein sehr bedeutsamer Befund ihrer Arbeit ist, dass nicht die Anzahl der Schuljahre *per se* mit der wirtschaft-

5 Siehe auch KNUDSEN et al. 2006.

lichen Situation und der Wachstumsrate eines Staates kovariert. Bolivien und Singapur z. B. sind zwei Extreme hinsichtlich ihrer Wirtschaftsleistung, Bolivien ist wirtschaftlich schwach, Singapur extrem stark. Beide Staaten bieten ihren Kindern ungefähr die gleiche durchschnittliche Anzahl an Schuljahren. So betrachtet könnte man meinen, dass Schule und Wirtschaftsleistung wenig miteinander zu tun haben. Das Bild ändert sich aber gewaltig, wenn man die Testergebnisse in Mathematik- und Naturwissenschaften betrachtet. Darin zeigen sich zwischen diesen beiden Staaten extreme Unterschiede. Die Leistungen sind in Bolivien deutlich geringer als in Singapur, und zwischen diesen Leistungen und der wirtschaftlichen Wachstumsrate besteht eine sehr enge Korrelation. Diese Zusammenhänge sind keine in Stein gehauenen kulturellen Unterschiede. Sie offenbaren aber, dass Investitionen in Bildung – hier gute Curricula und gute Lehrer für Mathematik und Naturwissenschaften – die *Brain Power* von Individuen steigern und dass damit die Lebensbedingungen einer Gesellschaft als Ganzes profitieren. Leistungen in Mathematik und Naturwissenschaften hängen übrigens eng mit den am Anfang skizzierten Grundfertigkeiten der Allgemeinen Intelligenz (Spanne des Arbeitsgedächtnisses, induktives und deduktives Schließen) zusammen. Die Analysen von HANUSHEK und WOESSMANN (2016) verdeutlichen, dass diese Kompetenzen auch durch Bildungsmaßnahmen gefördert werden können.⁶

Literatur

- ANDERSEN, S. L., and TEICHER, M. H.: Stress, sensitive periods and maturational events in adolescent depression. *Trends in Neurosciences* 31/4, 183–191 (2008), <https://doi.org/10.1016/j.tins.2008.01.004>
- BALTES, P. B., RÖSLER, F., and REUTER LORENZ, P. A.: Prologue: Biocultural co-constructivism as a theoretical metascript. In: BALTES, P. B., REUTER LORENZ, P. A., and RÖSLER, F. (Eds.): *Lifespan Development and the Brain*; pp. 3–39. Cambridge: Cambridge University Press 2006
- BARNETT, W. S.: Effectiveness of early educational intervention. *Science* 333/6045, 975–978 (2011), <https://doi.org/10.1126/science.1204534>
- BELSKY, J., BAKERMANS-KRANENBURG, M. J., and VAN IJZENDOORN, M. H.: For better and for worse: Differential susceptibility to environmental influences. *Current Directions in Psychological Science* 16/6, 300–304 (2007), <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2007.00525.x>
- BLAKEMORE, C., and COOPER, G. F.: Development of the brain depends on the visual environment. *Nature* 228/5270, 477–478 (1970)
- BOCK, J., WAINSTOCK, T., BRAUN, K., and SEGAL, M.: Stress in utero: Prenatal programming of brain plasticity and cognition. *Biological Psychiatry* 78/5, 315–326 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2015.02.036>
- BRAUER, J., ANWANDER, A., PERANI, D., and FRIEDERICI, A. D.: Dorsal and ventral pathways in language development. *Brain and Language* 127, 289–295 (2013)
- CASEY, B. J., SOMERVILLE, L. H., GOTLIB, I. H., AYDUK, O., FRANKLIN, N. T., ASKREN, M. K., JONIDES, J., BERMAN, M. G., WILSON, N. L., TESLOVICH, T., GLOVER, G., ZAYAS, V., MISCHEL, W., and SHODA, Y.: Behavioral and neural correlates of delay of gratification 40 years later. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108/36, 14998–15003 (2011), <https://doi.org/10.1073/pnas.1108561108>
- CASEY, B. J., TOTTENHAM, N., LISTON, C., and DURSTON, S.: Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences* 9/3, 104–110 (2005), <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.011>
- COE, C. L., KRAMER, M., KIRSCHBAUM, C., NETTER, P., and FUCHS, E.: Prenatal stress diminishes the cytokine response of leukocytes to endotoxin stimulation in juvenile rhesus monkeys. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism* 87/2, 675–681 (2002)

⁶ Siehe auch LUTZ 2017.

- CREMER, T.: Von der Genetik zur Epigenetik und Epigenomforschung – Essay zur Geschichte der Vererbungsforschung und zur Zukunft der prädiagnostischen Medizin. *Nova Acta Leopoldina NF 98/361*, 87–165 (2010)
- ESPINOSA, J. S., and STRYKER, M. P.: Development and plasticity of the primary visual cortex. *Neuron 75/2*, 230–249 (2012), <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.06.009>
- FRIEDERICI, A. D.: The brain basis of language processing: from structure to function. *Physiological Reviews 91/4*, 1357–1392 (2011), <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2011>
- GERVAIN, J., and MEHLER, J.: Speech perception and language acquisition in the first year of life. *Annual Review of Psychology 61/1*, 191–218 (2010), <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.100408>
- GILMORE, J. H., KNICKMEYER, R. C., and GAO, W.: Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nature Reviews Neuroscience 19/3*, 123–137 (2018), <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.1>
- HANUSHEK, E. A., and WOESSMANN, L.: Knowledge capital, growth, and the East Asian miracle. *Science 351/6271*, 344–345 (2016), <https://doi.org/10.1126/science.aad7796>
- HECKMAN, J. J.: Skill formation and the economics of investing in disadvantaged children. *Science 312/5782*, 1900–1902 (2006), <https://doi.org/10.1126/science.1128898>
- HÜBENER, M., and BONHOEFFER, T.: Neuronal plasticity: Beyond the critical period. *Cell 159/4*, 727–737 (2014), <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.10.035>
- KAROLY, P.: Mechanisms of self-regulation: A systems view. *Annual Review of Psychology 44*, 23–52 (1993), <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.44.020193.000323>
- KNUDSEN, E. I.: Sensitive periods in the development of the brain and behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience 16/8*, 1412–1425 (2004)
- KNUDSEN, E. I., HECKMAN, J. J., CAMERON, J. L., and SHONKOFF, J. P.: Economic, neurobiological, and behavioral perspectives on building America's future workforce. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA 103/27*, 10155–10162 (2006), <https://doi.org/10.1073/pnas.0600888103>
- LE GRAND, R., MONDLOCH, C. J., MAURER, D., and BRENT, H. P.: Early visual experience and face processing. *Nature 410*, 890 (2001)
- LEWKOWICZ, D. J.: The biological implausibility of the nature-nurture dichotomy and what it means for the study of infancy. *Infancy 16/4*, 331–367 (2011), <https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2011.00079.x>
- LIU, D., DIORIO, J., DAY, J. C., FRANCIS, D. D., and MEANEY, M. J.: Maternal care, hippocampal synaptogenesis and cognitive development in rats. *Nature Neuroscience 3/8*, 799–806 (2000), <https://doi.org/10.1038/77702>
- LUTZ, W.: Global sustainable development priorities 500 y after Luther: *Sola schola et sanitate*. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA 114/27*, 6904–6913 (2017), <https://doi.org/10.1073/pnas.1702609114>
- MAMPE, B., FRIEDERICI, A. D., CHRISTOPHE, A., and WERMKE, K.: Newborns' cry melody is shaped by their native language. *Current Biology 19/23*, 1994–1997 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.09.064>
- MAYBERRY, R., LOCK, E., and KAZMI, H.: Linguistic ability and early language exposure. *Nature 417*, 38 (2002)
- MISCHEL, W., SHODA, Y., and RODRIGUEZ, M. I.: Delay of gratification in children. *Science 244/4907*, 933–938 (1989)
- MOFFITT, T. E., ARSENEAULT, L., BELSKY, D., DICKSON, N., HANCOX, R. J., HARRINGTON, H., HOUTS, R., POULTON, R., ROBERTS, B. W., ROSS, S., SEARS, M. R., THOMSON, W. M., and CASPI, A.: A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy USA 108/7*, 2693–2698 (2011), <https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108>
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina: Frühkindliche Sozialisation: Biologische, psychologische, linguistische, soziologische und ökonomische Perspektiven. Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. 1. Aufl. Berlin: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2014*
- NISBETT, R. E., ARONSON, J., BLAIR, C., DICKENS, W., FLYNN, J., HALPERN, D. F., and TURKHEIMER, E.: Intelligence: New findings and theoretical developments. *American Psychologist 67/2*, 130–159 (2012), <https://doi.org/10.1037/a0026699>
- NOBLE, K. G., HOUSTON, S. M., BRITO, N. H., BARTSCH, H., KAN, E., KUPERMAN, J. M., AKSHOOMOFF, N., AMARAL, D. G., BLOSS, C. S., LIBIGER, O., SCHORK, N. J., MURRAY, S. S., CASEY, B. J., CHANG, L., ERNST, T. M., FRAZIER, J. A., GRUEN, J. R., KENNEDY, D. N., VAN ZIJL, P., MOSTOFSKY, S., KAUFMANN, W. E., KENET, T., DALE, A. M., JERNIGAN, T. L., and SOWELL, E. R.: Family income, parental education and brain structure in children and adolescents. *Nature Neuroscience 18/5*, 773–778 (2015), <https://doi.org/10.1038/nn.3983>
- PAKULAK, E., STEVENS, C., and NEVILLE, H.: Neuro-, cardio-, and immunoplasticity: Effects of early adversity. *Annual Review of Psychology 69*, 131–156 (2018), <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010416-044115>
- PUTZAR, L., GOERENDT, I., LANGE, K., RÖSLER, F., and RÖDER, B.: Early visual deprivation impairs multisensory interactions in humans. *Nature Neuroscience 10/10*, 1243–1245 (2007), <https://doi.org/10.1038/nn1978>

- RADTKE, K. M., RUF, M., GUNTER, H. M., DOHRMANN, K., SCHAUER, M., MEYER, A., and ELBERT, T.: Transgenerational impact of intimate partner violence on methylation in the promoter of the glucocorticoid receptor. *Translational Psychiatry* 1, e21 (2011)
- SCHOBER, P., and SPIESS, C. K.: Early childhood education activities and care arrangements of disadvantaged children in Germany. *Child Indicators Research* 6/4, 709–735 (2013), <https://doi.org/10.1007/s12187-013-9191-9>
- STERN, E., und NEUBAUER, A.: Intelligenz: Große Unterschiede und ihre Folgen. München: DVA 2013
- STRENZE, T.: Intelligence and socioeconomic success: A metaanalytic review of longitudinal research. *Intelligence* 35, 401–436 (2007)
- STUMM, S. VON, and PLOMIN, R.: Socioeconomic status and the growth of intelligence from infancy through adolescence. *Intelligence* 48, 30–36 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.10.002>
- TEICHER, M. H., SAMSON, J. A., ANDERSON, C. M., and OHASHI, K.: The effects of childhood maltreatment on brain structure, function and connectivity. *Nature Reviews Neuroscience* 17, 652–666 (2016)
- WEBER-FOX, C., and NEVILLE, H. J.: Maturation constraints on functional specializations for language processing: ERP and behavioral evidence in bilingual speakers. *Journal of Cognitive Neuroscience* 8/3, 231–256 (1996)
- ZHANG, T.-Y., and MEANEY, M. J.: Epigenetics and the environmental regulation of the genome and its function. *Annual Review of Psychology* 61/1, 439–466 (2010), <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.60.110707.163625>
- ZIOL-GUEST, K. M., DUNCAN, G. J., KALIL, A., and BOYCE, W. T.: Early childhood poverty, immune-mediated disease processes, and adult productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 109, Suppl. 2, 17289–17293 (2012), <https://doi.org/10.1073/pnas.1203167109>

Prof. Dr. Frank RÖSLER
Universität Hamburg
Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft
Abteilung für Biologische Psychologie
und Neuropsychologie
Von-Melle-Park 11
20146 Hamburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 40 4 28388091
E-Mail: frank.roesler@uni-hamburg.de

„Wasser“ und das internationale Engagement der Wissenschaftsakademien

Peter FRITZ ML (Machern)



Zusammenfassung

Die Vereinten Nationen (UN) und ihre internationalen Organisationen befassen sich intensiv mit dem Thema „Wasserverfügbarkeit“ in Entwicklungsländern. Ohne Wasser ist keine gesellschaftliche Entwicklung möglich. Somit ist es nicht erstaunlich, dass sich auch die Wissenschaftsakademien zunehmend dem Thema zuwenden, da wissenschaftlich fundierter Rat entscheidend ist für den Erfolg staatlicher Maßnahmen.

Deutlich wurde dies durch die Diskussion zu den Millenniumszielen, die von 2005 bis 2015 von den Vereinten Nationen aufgelegt wurden und die das Thema WASH (Wasser–Sanitär–Hygiene) zentral auf die Agenda setzten. Im Ergebnis dieser Ziele wurde tatsächlich das Problem „sauberes Trinkwasser“ halbiert, so dass heute laut Statistik nur noch ca. 700 Millionen statt 1,5 Milliarden Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser haben. Gleichzeitig hat sich im Sanitärbereich fast nichts getan, und ca. 2,5 Milliarden Menschen haben auch heute noch keinen Zugang zu angemessenen Sanitäreinrichtungen.

Seit 2015 gibt es nun einen neuen Versuch der UN, hier Wesentliches zu verändern, denn die UN haben die Nachhaltigkeitsziele oder *Sustainable Development Goals*, die mindestens bis 2030 gelten sollen, definiert. Hier folgte auch ein sehr deutlicher Ruf an die Wissenschaftsakademien, sich mit diesen zu befassen. Es kommt nun nicht mehr nur auf Einzellösungen für Wasser oder andere Lebensnotwendigkeiten an, sondern es geht gleichzeitig um die gesellschaftliche Entwicklung und Gestaltung der Zukunft. Themen, die weit über das normale Niveau der Entwicklungshilfe hinausgehen und heute direkt und vor allem vor Ort diskutiert werden müssen. Fundierter wissenschaftlicher Rat, basierend auf Vor-Ort-Kenntnissen, ist notwendiger denn je.

Der Vortrag befasst sich vorrangig mit dem Thema Wasser und dem Engagement der Wissenschaftsakademien im Rahmen der Nachhaltigkeitsziele und vor dem Hintergrund der bisherigen Erfahrung und den potentiellen Notwendigkeiten in der Zukunft. Konsequenzen für zukünftiges Handeln der Wissenschaftsakademien werden angesprochen.

Abstract

The United Nations (UN) and their organizations are deeply involved in the topic of water availability in developing countries. Without safe water no societal development is possible, and it is not surprising to see an increasing number of Science Academies directly or indirectly involved. Science based political advice is key to the success of any developmental concepts. This became especially clear during the period of 2005–2015 during which the UN had promoted the Millennium Goals and where WASH (Water–Sanitation–Hygiene) was central on the Agenda. The goal was to half the number of 1.5 billion humans with no access to clean drinking water as well as the 2.5 billion without adequate sanitation facilities.

As a consequence of this learning experience, the UN promoted as of 2015 the 17 Sustainability Development Goals which run to 2030. Now, a very clear call to all Science Academies went out asking for direct participation in the transformation of these goals into real activities. Assistance comes through the *InterAcademy Partnership* (IAP) where the Academies from 138 countries are networked. What is required is the development of integrated solutions to the complex problems of societal development and ecosystems protection. These challenges go beyond the classical developmental aid and require detailed discussion with those concerned. To be successful solid, broad based scientific policy advice is required.

Thus, this presentation looks preferentially at the topic “water” and the engagement of Science Academies in view of the SDGs. It does not provide solutions but is seen as a contribution to the understanding and functioning of the Academies in the 21st Century.

Sehr geehrter Herr Präsident,
verehrte Ehrengäste,
liebe Kolleginnen und Kollegen,
meine Damen und Herren!

Diese Jahrestagung soll einen Rückblick und Ausblick auf das sein, „wofür die Leopoldina vor zehn Jahren zur Nationalen Akademie ernannt und womit sie unter anderem betraut worden ist: die wissensbasierte Politikberatung und die internationale Vertretung der deutschen Wissenschaft im Ausland“.

Dies hört sich einfach an, ist aber ziemlich umfassend, denn es gibt ja verschiedene Ebenen der nationalen und internationalen Politikberatung – wie wir gestern auf der Podiumsdiskussion hören konnten. Hier möchte ich mich nur mit einem Aspekt befassen, dem der internationalen Kooperation mit dem Ziel der internationalen Beratung. Der Hintergrund ist, dass ich das Privileg hatte und habe, an einigen Auslandsaktivitäten der Leopoldina, vor allem in Brasilien und Afrika, beteiligt zu sein, und gebeten wurde, darüber zu berichten. Dem komme ich sehr gerne nach, wenn Sie mir verzeihen, dass Sie nun keinen sehr hochwissenschaftlichen Vortrag zu hören bekommen, sondern einen Bericht über meine Erfahrungen und einen Einblick in das Engagement der Leopoldina in internationalen Foren und Kooperationen, bei denen das Thema Wasser im Vordergrund steht oder zumindest besondere Beachtung erfährt. Dieser Vortrag ist somit die stark vereinfachte Darstellung eines sehr komplexen Themas, das nicht nur wissenschaftliche Dimensionen hat und sich am Ende auch nicht nur auf Wasser bezieht.

Lassen Sie mich deswegen auch zuerst den Rahmen abstecken, in dem wir uns mit diesem Thema bewegen. Danach werde ich über die Aktivitäten der Leopoldina berichten und kurz innerafrikanische Anstrengungen erwähnen, gefolgt von einem Hinweis auf das globale Netzwerk der Akademien IAP, an dem die Leopoldina beteiligt ist, und dann Schlussbemerkungen.

Der Rahmen: Die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen

Wie Sie wissen, hatten die Vereinten Nationen (UN) von 2005 bis 2015 die Millenniumziele aufgelegt – mit variablem Erfolg –, und diesen folgten im September 2015 und als Zielvorgabe für 2030 die *Sustainable Development Goals*, die SDGs, zur Sicherung einer nachhaltigen Existenz auf unserer Erde. Es wurden 17 Nachhaltigkeitsziele (Abb. 1) definiert und jedes der 17 SDG-Ziele mit Unterzielen untersetzt, so dass 269 Unterziele zugeordnet werden können. Wichtig ist für diesen Vortrag SDG 6, das sich an „WASH“-Zielen orientiert. WASH steht für Wasser, Sanitär und Hygiene und ist heute der gängige Begriff für die Basisversorgung in Entwicklungsländern. Dieses Nachhaltigkeitsziel soll das gesellschaftliche und natürliche Umfeld berücksichtigen, um dem geforderten Nachhaltigkeitsanspruch zu genügen.

Im Praktischen handelt es sich dann nicht mehr um den einzelnen Brunnen, der für eine Schule gebaut werden muss, obwohl dies ein sehr beliebtes Thema bei Hilfsorganisationen ist, sondern es müssen regionale, gesellschaftliche Bedingungen und Themen wie Abwasserbehandlung, Garten- und Ackerbau, Infrastruktur, Management, Bildung, Gesundheit, Ökosysteme usw. beachtet werden. Die SDGs bieten hier eine Leitschnur und beschreiben quasi eine Vision für eine nachhaltige Zukunft, geben aber keine spezifischen Handlungsanweisungen.



Abb. 1 Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen

Eine kurze Bemerkung zur Notwendigkeit und Dringlichkeit, hier etwas zu tun: Eine Studie in Mali zeigt, dass 80% der vorhandenen Brunnen nicht funktionieren und in Nord-Ghana 58% aller Wasserstellen repariert werden müssen. Diese Zahlen sind nicht ungewöhnlich, und die Organisation *Fair Water* schätzt, dass in Afrika mindestens 50 000 nicht funktionierende Brunnen existieren, was eine Investition von vielen Millionen Dollar erfordern würde. Allerdings schätze ich diese Zahlen insofern als viel zu niedrig ein, als unsere eigenen Beobachtungen in Sierra Leone zeigen, dass in dem *Chiefdom*, in dem wir zurzeit aktiv sind, zwar auch dort viele Brunnen nicht funktionieren, aber die Mehrheit der Brunnen Wasser liefert, jedoch davon der überwiegende Teil biologisch kontaminiert ist. Das heißt, Brunnenbau *per se* ist nur sehr selten eine nachhaltige Lösung der Trinkwasserprobleme, und Projekte der Entwicklungshilfe sollten grundsätzlich überdacht und breiter aufgestellt werden, um wenigstens etwas Nachhaltigkeit zu erreichen. Dies wird in den SDGs festgehalten.

Alle nationalen Regierungen, alle Nicht-Regierungs-Organisationen und auch die Wissenschaft sind deswegen von den Vereinten Nationen aufgerufen, sich an der Umsetzung dieser Ziele zu beteiligen. Dafür soll ein breiter gesellschaftlicher Konsens erarbeitet werden, wobei der Wissenschaft und damit auch den Akademien eine besondere Rolle zuge-dacht ist und auch zukommt, denn ihr **wissensbasierter Rat soll die Politik informieren und beeinflussen und so die Umsetzung der Ziele befördern.**

Auf Drängen der Vereinten Nationen werden nun in vielen Ländern Nachhaltigkeitsplattformen entwickelt, die als Rahmenbedingung für die bis jetzt oft fehlende Zusammenarbeit und Umsetzung dienen können. Auch Deutschland hat eine solche Plattform entwickelt und beteiligt sich an den freiwilligen nationalen Reviews zum Erreichen der Ziele, die im Fünfjahreszyklus von den UN eingefordert werden. Die Plattform wird vom *Institute for Advanced Sustainability Studies*, dem IASS, in Potsdam koordiniert und daran ist auch die Leopoldina beteiligt, denn der Präsident der Leopoldina ist Mitglied der wissen-

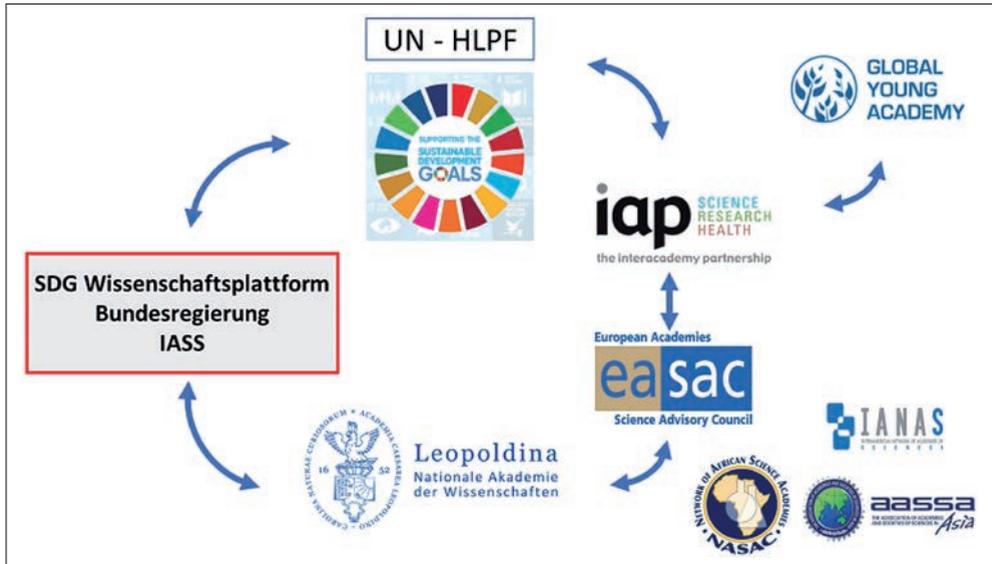


Abb. 2 SDG-Netzwerke mit der Leopoldina

schaftlichen Steuerungsgruppe. Wir werden in den kommenden Monaten sicherlich noch Einiges darüber hören.

Ich glaube es hilft dem Verständnis, wenn ich Ihnen kurz die wichtigsten Strukturen und Partner aufzeige, die an der Umsetzung beteiligt sind, natürlich stark vereinfacht dargestellt. Dies soll auch dazu dienen, Ihnen die für die Leopoldina besonders wichtigen Partner vorzustellen (Abb. 2).

Oben die SDGs und die UN-Foren, hier das *High Level Political Forum* (HLPF). Links die deutsche Wissenschaftsplattform des IASS, zu deren Arbeit die Leopoldina beiträgt. Da an dieser Plattform zahlreiche nicht-akademische Gruppen und auch Bundesministerien beteiligt sind, nenne ich dies die öffentliche Schleife, und auf der anderen Seite haben wir die Akademie-Schleife. Sie beginnt mit der *Inter-Academy Partnership* (IAP), die das globale Netzwerk von über 130 Nationalen Wissenschaftsakademien weltweit ist. Sie kommuniziert direkt mit dem HLPF, einem Gremium der Vereinten Nationen, das die Umsetzung der SDGs verfolgt. Darunter sehen Sie das *European Science Advisory Council* (EASAC), dies ist der Zusammenschluss der nationalen Wissenschaftsakademien der EU-Mitgliedstaaten, Norwegens und der Schweiz. Die Geschäftsstelle von EASAC wird von der Leopoldina geleitet und ist auch in Halle angesiedelt. EASAC erarbeitet wissenschaftsbasierte Politikberatung für die Institutionen der EU, vor allem adressiert an die Kommission und das Parlament. EASAC ist einer von insgesamt vier regionalen Zusammenschlüssen, die gemeinsam IAP bilden, Die anderen drei regionalen Akademie-Zusammenschlüsse sind das *InterAmerican Network of Academies of Sciences* (IANAS) in Nord- und Südamerika, *The Network of African Science Academies* (NASAC) in Afrika und *The Association of Academies and Societies of Sciences* (AASSA) in Asien.

Die *Global Young Academy* (GYA) – die ihre Geschäftsstelle ebenfalls in Halle eingerichtet hat, mit großer Unterstützung durch die Leopoldina – ist 2002 von IAP mit initiiert worden. Sie ist eine Akademie für Nachwuchswissenschaftler aus allen Ländern der Welt.

Sie steht als global-übergreifende Organisation allen Nationalen Jungen Akademien zur Seite und sieht es unter anderem als ihre Aufgabe an, gesellschaftlich relevantes Handeln auf der Basis wissenschaftlichen Wissens zu fördern.

Wie erwähnt verfolgt das High Level Political Forum für die UN die globale Umsetzung „der SDGs und hält für 2018 zum Thema Wasser (SDG 6) Folgendes fest:

„Achieving universal access to safe and affordable drinking water means providing basic water services to 844 million people and improving service quality to 2.1 billion people who lack safely managed drinking water services.

Billions of people still need access to basic toilet and handwashing facilities. Over 2.3 billion people lack basic sanitation services, 892 million still practice open defecation and 4.5 billion people lack safely managed sanitation services.

Improving water quality can increase water availability. Worsening water pollution must be tackled at source and treated to protect public health and the environment and to increase water availability.

Good water governance is an essential pillar for implementing SDG 6. Yet governance structures tend to be weak and fragmented in many countries. Good water governance provides the political, institutional and administrative rules, practices and processes for taking decisions and implementing them.

The transformative vision and ambition of Member States to end poverty and hunger everywhere, to combat inequalities within and among countries, to build peaceful, just and inclusive societies, and to protect human rights everywhere is at the heart of the 2030 Agenda. Water is central to achieving this vision and ambition. It is essential for society’s health and well-being, ending hunger, achieving food security and improving nutrition.“¹

Dies sollte als Aufruf zum Handeln verstanden werden und umfasst nicht nur die absolut notwendigen WASH-Aktivitäten (Wasser-Verfügbarkeit, Sanitär und Hygiene), sondern am Ende einen viel breiteren Aktionsradius zum Thema Wasser, in dem – wie erwähnt – rein wissenschaftliche sowie die ökologischen, ökonomischen, politischen und gesellschaftlichen Dimensionen eine Rolle spielen.

Das Engagement der Leopoldina

An diesen Entwicklungen beteiligte sich die Leopoldina indirekt, denn das Engagement der Leopoldina bestand schon vor der Festlegung der SDGs. Anlass war eine Initiative des IAP, das eine Wasser-für-Afrika-Initiative forderte, da die Frage nach Wasser als verfügbarer Ressource vor allen anderen Fragen zu beantworten war. Deswegen hatte die Leopoldina schon im Frühjahr 2011 in Abstimmung mit und Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eine Nachhaltigkeitsdebatte mit dem Netzwerk der afrikanischen Wissenschaftsakademien, dem NASAC, begonnen. Und so trafen sich im Frühjahr 2012 Wissenschaftler des NASAC, der königlich-holländischen Akademie der Wissenschaften (KNAW) und der Leopoldina in Mauritius, um über das Thema Wasser in Afrika zu reden und um dann auf der Grundlage des Treffens eine Stellungnahme, gerichtet an Politik und Gesellschaft, zu erarbeiten.

Für dieses *Policy Paper* wurden von den afrikanischen Akademien exzellente Analysen und sehr extensive regionale Zusammenfassungen der Wassersituation in den verschiedenen Regionen Afrikas erstellt. Eine Zusammenfassung dieser Berichte wurde dann, wiederum unter Beteiligung der Leopoldina, 2014 fertiggestellt und veröffentlicht. Sie enthält in bewusst knapper Form neun Handlungsanweisungen (Abb. 3).

1 United Nations 2018.

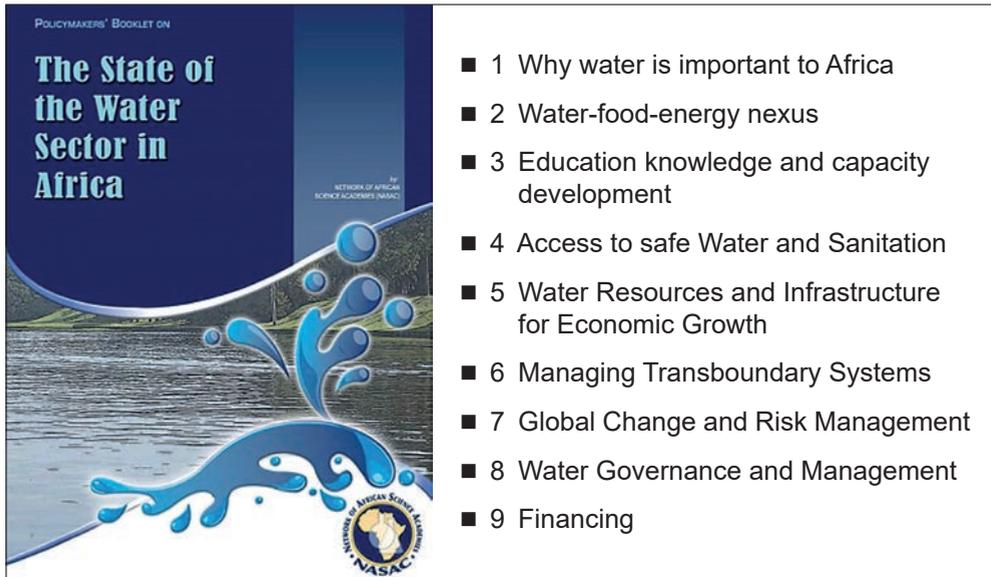


Abb. 3 NASAC-Broschüre zu Wasser in Afrika (Nairobi, 2014)

Sie sehen, das ist ein breites Spektrum von Fragen, das hier andiskutiert wird. Sie erkennen auch die Ähnlichkeit mit den SDGs, und – besonders wichtig – im Text des NASAC-Papiers werden auch Handlungsoptionen vorgestellt. Viele Fragen bedürfen allerdings nach wie vor größerer wissenschaftlicher und politischer Anstrengungen, bevor sich wirkliche, d. h. realisierbare und wirksame Lösungen abzeichnen. Es bedarf auch der Koordinierung dieser Aktivitäten und insgesamt eines engeren Austausches zwischen Wissenschaft und Politik, und das zumindest auf regionaler und lokaler Basis. Denkbar ist auch, dass hier der NASAC mit seinen 24 Mitglieds-Akademien und den Jungen Akademien Afrikas wesentliche Basisarbeit leistet und dabei die Partnerschaft mit nicht-afrikanischen Akademien sucht.

Es sei nur kurz bemerkt, dass es in Afrika zurzeit 12 Junge Akademien gibt, die sich nicht nur auf wissenschaftliche Forschung fokussieren, sondern sich auch gesellschaftsrelevanten Themen und der Politikberatung widmen. Somit sind sie in der Diskussion um Wasser in Afrika Partner der Senior-Akademien. Es ist allerdings wünschenswert, vor allem für die Konkretisierung der wissenschaftlichen Aufgaben, noch vor der Politikberatung mit außerafrikanischen Partnern zusammenzuarbeiten, wie dies in der Verbindung zur Leopoldina der Fall ist. Weiterhin sollte die existierende Zusammenarbeit mit der *Global Young Academy* ausgebaut werden.

Die Leopoldina hat nicht nur die Etablierung der GYA-Geschäftsstelle in Halle unterstützt, sondern zeigt darüber hinaus ein aktives Engagement mit und für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Ausgelöst durch ein deutsch-brasilianisches Wissenschaftsjahr 2013/2014, das vorrangig vom deutschen Außenministerium und vom BMBF gefördert wurde, hat die Leopoldina eine Reihe von internationalen Workshops für junge Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen organisiert. Genauer gesagt: In Zusammenarbeit mit der Brasilianischen Akademie der Wissenschaften (ABC) wurde 2014 ein Wasserworkshop für junge deutsche und brasilianische Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen aus-

gerichtet, der sich mit dem Thema „Water in Urban Regions“² und dem Schwerpunkt auf dem peri-urbanen Raum beschäftigte. Eingeladen wurden junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die sich durch ihre Fähigkeit, interdisziplinär zu arbeiten, ausgezeichnet hatten. Dies geschah ohne Vorgabe von Fachrichtungen, so dass ein sehr buntes Spektrum an Teilnehmern zusammenkam. Das Format des Workshops war sehr offen, ohne Egovorträge. Die angedachten Inhalte wurden nur durch einen einleitenden Vortrag vorgegeben. Die Organisation der Diskussion blieb den Teilnehmern überlassen, ebenso das Format des Schlussberichts. Wichtig war nur, dass sich alle, auch diejenigen ohne eigene wissenschaftliche Erfahrung, beteiligen konnten. Ziel war ein „Policy Paper“ zu schreiben, das die Ansichten der jungen Generation auf die Problematik dieses Raumes darlegt, und zwar für beides: Forschung und Entwicklung.

Der Ansatz war so erfolgreich, dass sowohl die brasilianische Akademie der Wissenschaften als auch die Leopoldina beschlossen, weitere Treffen dieser Art zu organisieren. Der zweite Workshop im Herbst 2016 befasste sich konkreter mit dem urbanen Raum, ebenfalls mit einem gedruckten Abschlussdokument.³

Und nun steht übernächste Woche der dritte Workshop an, der auf Vorschlag der Brasilianer dem Thema „Wasser in Bergbaufolgelandschaften“ gewidmet wird. Auch hier hoffen



Abb. 4 Broschüre des ersten deutsch-brasilianischen Workshops für junge Wissenschaftler

2 German National Academy of Sciences Leopoldina et al. 2014.

3 German National Academy of Sciences Leopoldina et al. 2017.

wir, dass wieder ein Dokument entsteht, das Optionen für politische Entscheidungen aufzeigt und auch wieder potentielle Forschungsthemen beschreibt.⁴

Außerdem ist eine von der Leopoldina initiierte Plattform entstanden, die diese jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler anspricht und die Kontakte aufrechterhält. Damit ist auch die Option für zukünftige gemeinsame Aktionen gegeben. Also ein interessantes Spektrum an Wasser-bezogenen Aktivitäten.

Hinzu kommt nun noch das Engagement innerhalb der IAP, über das ich gleich berichten werde. Das Engagement der Leopoldina ist somit auch in Zukunft von Bedeutung und dies vor allem in einer starken internationalen Zusammenarbeit von Akademie-Netzwerken. Dies ist nicht immer einfach, denn es ist leider auch Realität, dass globale Ansätze oft an strukturellen und partizipatorischen Defiziten scheitern, die eine Umsetzung definierter Ziele verhindern.

Weiterhin ist zu erwarten, dass sich in Zukunft in Afrika einiges ändert, denn auch die Afrikanische Union ist sehr aktiv und hat auf hoher politischer Ebene Strategien bis 2024 und 2025 entworfen, welche die vorrangigen Probleme auch im Wasserbereich sehr deutlich aufzeigen (Abb. 5).

Auch hier ergeben sich viele Möglichkeiten einer Zusammenarbeit von Akademien, die dazu führen muss, dass nicht nur das vorhandene Wissen politisch wahrgenommen wird, sondern auch klare Umsetzungsziele und wissenschaftliche „Lücken“ definiert werden.

Dies hört sich alles sehr positiv an, und man darf gespannt sein, wie letztendlich die Umsetzung der SDGs erreicht wird, denn, ich will betonen, Nachhaltigkeitsziele im klassischen, ökologischen, Sinn sind die SDGs nicht, sondern es sind Werkzeuge, die notwendig sind, um wenigstens die größten Nachhaltigkeitsprobleme dieser Erde global in den Griff zu bekommen.

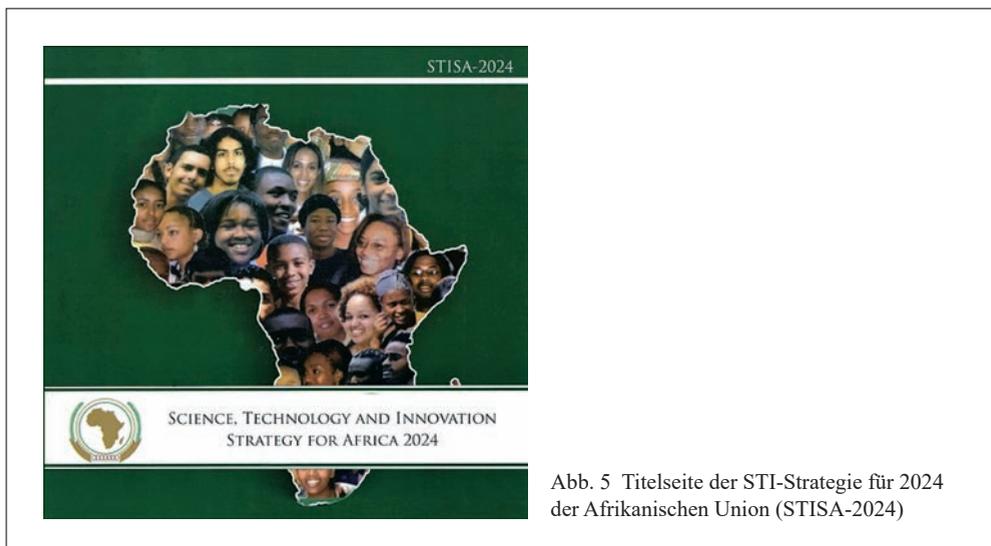


Abb. 5 Titelseite der STI-Strategie für 2024 der Afrikanischen Union (STISA-2024)

4 German National Academy of Sciences Leopoldina et al. 2019 (in Vorbereitung).

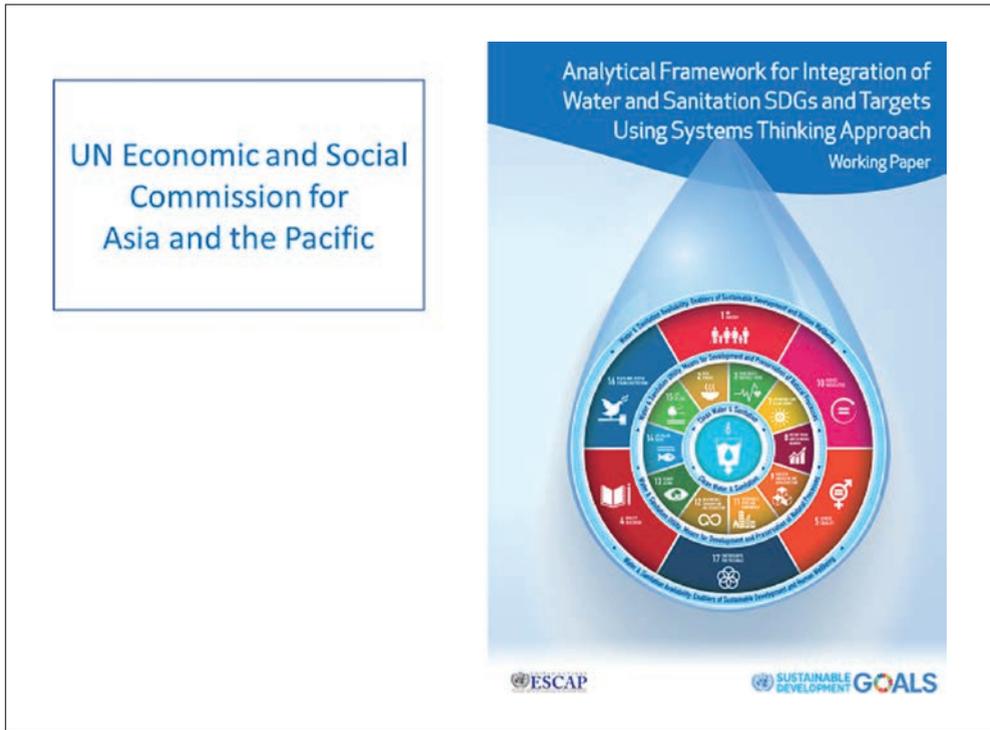


Abb. 6 Titelseite der ESCAP-Broschüre zur Umsetzung von SDG 6

Interessant ist dann der Versuch der *UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific* (ESCAP), SDG 6 in einem integrierten Systemansatz mit den anderen SDGs und deren Zielen zu vernetzen und dann eine *Road Map* abzuleiten:

„The results of this study confirm that the 17 SDGs are interconnected in one indivisible system, and that attaining many of the targets will rely on access to water resources and sanitation. On the other hand, successful implementation of the SDG 6 on Water and Sanitation will depend on effectively managing waste water and sanitation, water efficiency, and harnessing the interdependencies with the other SDGs. Understanding these complementarities and interlinkages, using integrated management and a systems-based analytical approach, will assist countries to devise SDG implementation strategies that harness and eliminate trade-offs between the different SDGs. In addition, defining leverage points for high impact action will assist governments to attract the required investments for implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development and the SDGs.“⁵

Dies im Detail weiter auszuführen, wäre ein eigener Vortrag, aber erwähnt sei, dass ein Aspekt fast überall zu kurz kommt: Der Erfolg der Umsetzung von Nachhaltigkeitszielen verlangt, dass in vielen Gesellschaften für die Umsetzung von SDG-Strategien ein gesellschaftlicher Wandel stattfinden und sich die Gesellschaftsmentalität (Volksmentalität) ändern muss. Solange diese Transformationsprozesse – und um solche handelt es sich – nicht „von innen heraus“ gesellschaftlich akzeptiert sind, können sie nicht nachhaltig etabliert

5 United Nations 2016.

werden. Hier dürften die Verhaltenswissenschaften von großer Hilfe sein, denn dem klassischen Naturwissenschaftler fehlen dafür die Werkzeuge.

Indirekt bedeutet dies auch, dass jede Aktivität zur Umsetzung der SDGs und daraus abgeleitete Politikberatung das gesamte Spektrum der Wissenschaften umfassen sollte: von den verschiedenen Naturwissenschaften und der Medizin bis hin zu den Technik- und Gesellschaftswissenschaften. Wer in Deutschland ist da für eine koordinierende Tätigkeit besser aufgestellt als die Leopoldina? Die Akademie kann sich dies zumindest vorstellen. Die in den SDGs aufgezeigten Zusammenhänge sind so komplex, dass ohne wissenschaftliche Aufarbeitung und Sichtbarmachung der inneren Zusammenhänge keine Umsetzung auf staatlicher Ebene zu erwarten ist.

Ganz ähnlich wie die asiatischen Akademien mit ESCAP sind die Akademien Südamerikas mit ihrem Netzwerk IANAS (*Inter-American Network of Academies of Sciences*) aktiv geworden und haben mit 120 Autoren aus 20 Ländern und unter dem Titel „Urban Water Challenges in the Americas (2015)“ nationale Perspektiven und eine Synthese der häufigsten städtischen Wassermanagementprobleme aufgezeigt, und zwar unter Beachtung der regionalen Unterschiedlichkeiten.⁶

Andererseits, machen wir uns nichts vor, wir haben die Natur verändert und, wie Wolfgang HABER schon 1994 sagte:

„Letztlich müssen wir anerkennen, dass die kulturelle Entwicklung der Menschheit insbesondere im industriell technischen Stadium, sich über die Nachhaltige Organisation der Natur hinweggesetzt hat, und zwar irreversibel. Daher kann die Diskussion über Nachhaltigkeit höchstens als Anregung dienen, wie man die schlimmen Auswüchse dieser Entwicklung korrigieren kann.“⁷

IAP-Arbeitsgruppen

Das globale Netzwerk der Nationalen Wissenschaftsakademien IAP (*InterAcademy Partnership*) akzeptiert, dass es möglich sein sollte, über die SDGs global etwas zu ändern, und versucht neben vielfältigen internationalen und nationalen Anstrengungen entsprechende Aktionsbereiche für die Wissenschaft aufzuzeigen.

Dies wird als wichtiges Element für eine solide Wissenschaftsberatung angesehen, auch wenn es noch viele Wissenslücken und fehlende Kapazitäten gibt. IAP mit ihren 138 Akademien als Mitglieder hat diese Herausforderung für sich und die beteiligten Akademien angenommen. Sie hat – u. a. mit Finanzierung durch die *Carnegie Foundation* – drei Arbeitsgruppen eingesetzt, an denen auch die Leopoldina beteiligt ist.

Die erste dieser Gruppen befasst sich ganz grundsätzlich mit dem möglichen Engagement der Akademien bei der SDG-Umsetzung und ihrer Funktion in der wissenschaftsbasierten Politikberatung. Der erste Schritt war eine Umfrage bei allen 138 Akademien, die der IAP angehören, um die Positionierung der Akademien zu den SDG-Zielen und deren Engagement für die Umsetzung zu erfahren. Die Leopoldina hat darauf sehr ausführlich geantwortet und gezeigt, wie sehr diese Themen hier bereits angekommen sind. Dies war noch nicht bei allen Akademien der Fall, doch man erwartet, dass die Frage, ob die Akademien fit für das 21. Jahrhundert sind, positiv und im Sinne der SDGs beantwortet werden kann.

6 *Inter-American Network of Academies of Sciences* 2015.

7 HABER 1994.

Die Frage nach den Strukturen und Aufgaben der Akademien im 21. Jahrhundert wurde letzte Woche auch innerhalb von EASAC in einem IAP-Regionalworkshop, der von der Leopoldina hier in Halle organisiert worden war, diskutiert. Ähnliche Regionalworkshops finden in den anderen drei Regionen mit Regionalnetzwerken statt, also in Asien, Afrika und den Amerikas. Wir sind gespannt, wie sich die Ergebnisse darstellen und wie sie dann auf dem *UN High Level Political Forum 2019* dargelegt werden. Noch ist es zu früh, darüber zu spekulieren, aber wir können davon ausgehen, dass die Akademien, d.h. deren Mitglieder, noch intensiver zur Mitarbeit aufgefordert werden, und unsere Sektionen in der Leopoldina sollten sich diesem Ruf nicht verschließen.

Die zweite Arbeitsgruppe arbeitet wesentlich konkreter und befasst sich mit der Frage nach der Einführung und Verbreitung von *Science, Engineering and Medicine* (SEM) in Afrika auf allen Ebenen der Ausbildung und damit der nationalen Entwicklung. Es gibt dabei bereits konkrete Anstrengungen der afrikanischen Akademien, Politik und Entscheidungsträger über diese Ziele zu informieren und somit die entsprechende wissenschaftlich fundierte Politikberatung zu leisten.

Weiterhin interessant ist, dass die IAP-Arbeitsgruppe damit begonnen hat, die Einbindung von afrikanischen Diaspora-Wissenschaftlern zu organisieren und feste Strukturen zu schaffen; konkrete Szenarien und Pläne auch für deren Finanzierung sind im Entstehen oder funktionieren bereits.

Die dritte Gruppe ringt mit der Frage, wie Armut auf diesem Planeten ausgerottet werden kann. Dies ist sicherlich die schwierigste Aufgabe, und sie wird in diesem Gremium nicht gelöst werden, aber man hofft auf Denkanstöße, die weiterführen. Interessant ist vor allem, dass unsere chinesischen Kollegen beispielhaft und sehr konkret vorführen, wie der Pfad aussehen sollte, um das Ziel zu erreichen, und sie erheben den Anspruch, dies regional in China bereits demonstriert und umgesetzt zu haben.

Schlussbemerkungen

Was heißt dies nun für die Zukunft der Einbindung der Akademien in die Umsetzung der Nachhaltigkeitsstrategien? Die *InterAcademy Partnership* (IAP) versucht mit den genannten Arbeitsgruppen, Wege zur Lösung der globalen Nachhaltigkeitsprobleme und dem notwendigen Engagement der Akademien aufzuzeigen. Dies ist nicht einfach, obwohl die Mehrheit der Wissenschaftsakademien aktiv in die Politikberatung einbezogen ist. Dies gilt auch für die neugegründeten Akademien Afrikas. Mit ihnen sollte die transdisziplinäre Diskussion auf Augenhöhe intensiviert werden, insbesondere wenn bestehende Netzwerke wie das NASAC genutzt werden. Diese Partnerschaften sollten in Afrika die Jungen Akademien einschließen, da bei ihnen die wissenschaftliche Neugierde und Kompetenz, neben der Bereitschaft, praktische Projekte anzufassen, sehr ausgeprägt ist.

Wir müssen die anstehenden Themen zur Entwicklung Afrikas auf einer breiten Basis diskutieren und vor allem mit den Betroffenen. Konzepte, die hier bei uns ohne Zusammenarbeit mit lokalen Vor-Ort-Experten entwickelt werden, sind fast immer erfolglos, da sie nicht angenommen werden. Berichte über Misserfolge dieser Art gibt es in großer Zahl. Andererseits werden unsere Erfahrung und unser Rat gebraucht – und auch gesucht.

Ich sehe – schon im eigenen Interesse – die Notwendigkeit, die Zusammenarbeit mit Afrika zu vertiefen, und das braucht die Fähigkeit, in längeren Zeiträumen zu denken und

zu handeln. Hierfür sind die Akademien bzw. ihre Mitglieder wesentlich besser aufgestellt als die sonstige akademische Welt. Deswegen wird versucht, die Akademien zu mobilisieren, denn sie sollten die Gesprächspartner sein. Es ist dabei völlig klar, dass wir unsere akademischen Aufgaben nicht völlig in das Praktische verschieben wollen und können, aber wir müssen uns an der internationalen Erarbeitung der gesellschaftlich notwendigen Veränderungen und Einbringung wissenschaftlicher Potentiale auf der Basis unseres Wissens beteiligen, so dass eine politische Umsetzung ebenso wie gesellschaftliche Veränderungen und Entwicklungen möglich werden.

Das in der Diskussion zur Umsetzung der SDGs verwendete Schlagwort ist wissenschaftsbasierte Politikberatung; und das ist ja nichts anderes, als dass Wissen und nicht nur politisch motivierte Emotionen zur Analyse und Lösung von gesellschaftsrelevanten Fragen zur Verfügung gestellt wird. ... Und da gesellschaftliche Fragen immer multidimensional sind, genügt ein isolierter wissenschaftlicher Blickwinkel nicht. In jeder Diskussionsrunde zur Nachhaltigkeit der Forschung wird heute gefordert, dass neben einer exzellenten, Neugierde-basierten Grundlagenforschung auch eine inter- und transdisziplinäre oder transformative Wissenschaft entwickelt wird. Damit – und um alle Chancen für die Entwicklung zu nutzen – ist die Vernetzung von Ingenieur- und Naturwissenschaften mit den Gesellschaftswissenschaften (Soziologie, Ökonomie, Recht und Politik) und dann auch mit der Medizin eine Voraussetzung für nachhaltigen Erfolg.

Dies muss gelernt werden und erfordert an manchen Stellen Workshops und Schulungen. Und dies nicht nur *pro-forma* und als notwendiges Übel, sondern real und umsetzungsstark. Die Aufgeschlossenheit zur Vernetzung muss auch in den Akademien und unter deren Mitgliedern eine Heimat finden. Hier besteht noch Handlungsbedarf.

Lassen Sie mich – nochmals auch mit Blick auf die Podiumsdiskussion gestern, auf der immer wieder das Thema Werte angesprochen wurde – abschließend den Bundespräsidenten a. D. Horst KÖHLER von einer deutsch-afrikanischen Tagung im März 2018 in Berlin zitieren:

„Was wir für die deutsch-afrikanischen Beziehungen brauchen, ist eine neue Bescheidenheit in unserer Haltung und eine neue Leidenschaft in unserem Handeln. Wir brauchen nichts anderes als einen Kulturwandel in unserer Afrikapolitik, der den historischen Umbrüchen Rechnung trägt, die Afrika gegenwärtig erlebt, und der endlich die globale Bedeutung dieses Kontinents ernst nimmt. Ein solcher Kulturwandel verlangt uns einiges ab: Selbstkritik, Differenzierung, Geduld, ein kleines bisschen Mut – und politischen Willen, den Wandel in der Haltung auch in die Umsetzung zu bringen.“

Literatur

German National Academy of Sciences Leopoldina, Brazilian Academy of Sciences and German Young Academy (Eds.): *Water in Urban Regions: Building Future Knowledge to Integrate Land Use, Ecosystem Services and Human Health*. Science Policy Report. Halle (Saale) 2014

German National Academy of Sciences Leopoldina, Brazilian Academy of Sciences and Centre for Water and Environmental Research at the University of Duisburg-Essen (Eds.): *How Do We Want to Live Tomorrow? Perspectives on Water Management in Urban Regions*. Science Policy Report. Halle (Saale) 2017

German National Academy of Sciences Leopoldina, Brazilian Academy of Sciences, Centre for Water and Environmental Research at the University of Duisburg-Essen and Brazilian National Institute of Science and Technology on Mineral Resources, Water and Biodiversity (Eds.): *A New Vision of Water and Sustainability Management in Mining and Post-mining Landscapes*. Science Policy Report. Halle (Saale) 2019 (in Vorbereitung)

Peter Fritz

- HABER, W.: Nachhaltige Entwicklung aus ökologischer Sicht. Zeitschrift für angewandte Umweltforschung 7/1, 9–13 (1994)
- Inter-American Network of Academies of Sciences: Urban Water Challenges in the Americas*. Montevideo: UNESCO 2015
- NASAC* [Network of Africa Science Academies]: The Grand Challenge of Water Security in Africa. Recommendations to Policymakers. 2014
- STISA-2014: Science, Technology and Innovation Strategy and Innovation Strategy for Africa 2024*. Addis Ababa: African Union Commission o. J.
- UN Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP): Analytical Framework for Integration of Water and Sanitation SDGs and Targets Using Systems Thinking Approach*. Working Paper. Bangkok: United Nations Publication 2016
- United Nations: United Nations Publication*. Bangkok (Thailand) 2016
- United Nations: Sustainable Development Goal 6. Synthesis Report on Water and Sanitation*. New York: United Nations 2018

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Peter FRITZ
Eichenweg 7
04827 Machern
Bundesrepublik Deutschland
E-Mail: peter.fritz@ufz

Ernährungssicherung und Landwirtschaft

Regina BIRNER (Hohenheim)



Zusammenfassung

Ernährungssicherung ist die vorrangige Aufgabe der Landwirtschaft. Obwohl der wissenschaftlich-technische Fortschritt die Landwirtschaft prinzipiell in die Lage versetzt hat, eine stark angestiegene Weltbevölkerung zu ernähren, sind weiterhin mehr als 800 Millionen Menschen von Hunger betroffen. Noch wesentlich höher liegt die Zahl der Menschen, die auf Grund einer einseitigen Ernährung an „verstecktem Hunger“ (Mangel an Mikronährstoffen) leiden. Als Problem kommt hinzu, dass derzeitige Verfahren der Erzeugung von Nahrungsmitteln mit erheblichen Umweltproblemen verbunden sind, obwohl umweltfreundlichere Produktionsverfahren zur Verfügung stehen. Die Herausforderungen einer nachhaltigen Ernährungssicherung werden sich in Zukunft noch verschärfen, da die Weltbevölkerung weiterwächst, weitere Produktionssteigerungen der Landwirtschaft aber durch den Klimawandel erschwert werden. In dem Beitrag werden die Ursachen für diese Probleme analysiert. Insbesondere wird auf die Frage eingegangen, warum das Potenzial der Landwirtschaft für eine nachhaltige Ernährungssicherung in der Praxis nur unzureichend umgesetzt wird. Dazu wird ein Analyserahmen verwendet, der auf dem *Governance*-Konzept beruht, wobei *Governance* als Steuerung verstanden wird. Die Analyse zeigt, dass Steuerungsprobleme des Marktes, insbesondere externe Effekte, Informationsasymmetrien und das Problem des kollektiven Handelns den beobachteten Herausforderungen des Agrar- und Ernährungssystems zu Grunde liegen. Weiterhin wird analysiert, warum Staat und Zivilgesellschaft nur unzureichend steuernd eingreifen, um die Probleme der Marktsteuerung zu beheben. Auf der Basis dieser Analyse werden Schlussfolgerungen für die Gestaltung von Politikprozessen im Agrar- und Ernährungssektor gezogen, wobei auch die Rolle der Wissenschaft im Politikprozess betrachtet wird.

Abstract

Food security is the primary goal of agriculture. Scientific progress and technical change have, in principle, enabled the agricultural sector to feed the global population in spite of its rapid increase in the past decades. Yet, there are still more than 800 Million people hungry, and the number of people suffering from micro-nutrient deficiency is even higher. Moreover, obesity is on the rise. A major challenge for ensuring sustainable food security and nutrition is the fact that current methods of food production are associated with considerable environmental problems, even though more environmentally friendly production practices are available. This paper analyzes the underlying problems of this challenge. An analytical framework is used that is based on the concept of governance. The analysis shows that the problems of the agri-food system are ultimately rooted in governance problems of the market mechanism, in particular external effects, information asymmetries and the problem of collective action. The governance framework is also used to analyze why the public sector and civil society have, so far, not been able to address market failures and solve the problems of the agri-food system. Conclusions are drawn with regard to future policy processes in the agri-food system and the role of science.

1. Einführung

Die nachhaltige Sicherung der Ernährung ist die vorrangige Aufgabe der Landwirtschaft. Seit Beginn der Agrarrevolution in England, die der industriellen Revolution vorausging,¹ haben wissenschaftliche Erkenntnisse und technischer Fortschritt die Produktivität der Landwirtschaft vervielfacht. Doch obwohl bei globaler Betrachtung die Landwirtschaft gegenwärtig das Potenzial hat, die gesamte Weltbevölkerung zu ernähren, sind weiterhin mehr als 800 Millionen Menschen von Hunger betroffen, und ihre Zahl steigt sogar in letzter Zeit wieder, nach Jahrzehnten eines kontinuierlichen Rückgangs (FAO et al. 2018). Noch wesentlich höher liegt die Zahl der Menschen, die auf Grund einer einseitigen Ernährung an einem Mangel an Mikronährstoffen leiden, der zu Krankheitsbelastungen führt und auch als „versteckter Hunger“ bezeichnet wird (GÖDECKE et al. 2018). Hinzu kommt die Problematik, dass zunehmend auch in Entwicklungsländern ein steigender Anteil der Bevölkerung von Übergewicht und den damit verbundenen gesundheitlichen Problemen betroffen ist (IAP 2018).

Die Probleme von Hunger und Fehlernährung sind vielfältig und können nicht allein der Landwirtschaft angelastet werden. Vor diesem Hintergrund hat sich in den letzten Jahren das Konzept des Agrar- und Ernährungssystems etabliert. Nach der Definition der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation FAO (*Food and Agriculture Organisation*) der Vereinten Nationen, beinhaltet dieses System „alle Elemente (Umwelt, Menschen, Vorleistungen, Prozesse, Infrastruktur, Institutionen etc.) und Aktivitäten, die mit der Produktion, der Verarbeitung, der Verteilung, der Zubereitung und dem Verzehr von Nahrungsmitteln verbunden sind sowie die Auswirkungen dieser Aktivitäten, einschließlich der sozio-ökonomischen Auswirkungen und der Umweltwirkungen“.² Nach dieser Definition umfasst das Agrar- und Ernährungssystem die Gesamtheit aller Wertschöpfungsketten für Nahrungsmittel.

Globale Analysen des Agrar- und Ernährungssystems kommen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass das Agrar- und Ernährungssystem nicht nur Defizite im Hinblick auf die Ernährungssicherung aufweist, sondern auch mit erheblichen negativen Umweltwirkungen verbunden ist. Dazu gehören die Degradierung landwirtschaftlich genutzter Böden, die Übernutzung und Belastung von Gewässern, der Verlust an Biodiversität und erhebliche Treibhausgasemissionen. Diese Probleme bestehen, obwohl durchaus umweltfreundlichere Produktionsverfahren zur Verfügung stehen.³ Wendet man den Blick auf die Zukunft, so ist abzusehen, dass sich die gegenwärtigen Probleme noch weiter verschärfen werden, wenn keine Umsteuerung erfolgt. Zu den Herausforderungen der Zukunft gehören die weiterhin steigende Weltbevölkerung, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft und die zunehmende Konkurrenz um landwirtschaftliche Flächen für die Erzeugung von Energie und Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen als Folge der sich entwickelnden Bioökonomie.⁴

1 Der Beginn der Agrarrevolution in England ist unter Historikern umstritten. Siehe dazu ALLEN 1999, der zeigte, dass bereits vom 16. Jahrhundert an erhebliche Ertragssteigerungen der englischen Landwirtschaft zu beobachten waren.

2 Im Originaltext lautet die Definition wie folgt: „A food system gathers all the elements (environment, people, inputs, processes, infrastructures, institutions, etc.) and activities that relate to the production, processing, distribution, preparation and consumption of food, and the outputs of these activities, including socio-economic and environmental outcomes.“ (HLPE 2014, S. 29.)

3 Siehe z. B. EASAC 2017, HLPE 2017, IAASTD 2009.

4 Siehe z. B. BIRNER und PRAY 2018.

Die internationale Wissenschaftsgemeinschaft hat im letzten Jahrzehnt im Rahmen verschiedener Initiativen umfangreiche Empfehlungen dazu vorgelegt, wie die Agrar- und Ernährungswissenschaften zur Lösung dieser globalen Herausforderungen beitragen können. Zu diesen Initiativen gehört das im Deutschen auch als „Weltaqrarbericht“ bezeichnete *International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD 2009)* sowie der Bericht des Gremiums hochrangiger Experten des Welternährungsausschusses zu *Nutrition and Food Systems (HLPE 2017)*, aber auch der Bericht *Agriculture and Food Systems to 2050*, der vom wissenschaftlichen Beratungsgremium der internationalen Agrarforschungszentren erstellt wurde (SERRAJ und PINGALI 2019).

Auch die Wissenschaftsakademien haben sich auf globaler Ebene diesem wichtigen Thema angenommen. Eine besonders umfangreiche Initiative in dieser Hinsicht war das Projekt zu Ernährungssicherung und Landwirtschaft der *Interacademy Partnership*, in der mehr als 130 nationale Wissenschaftsakademien zusammengeschlossen sind. Im Rahmen dieses Projektes erstellten die regionalen Akademie-Netzwerke für Afrika, Asien, Amerika und Europa jeweils eigene Berichte zu Ernährungssicherung und Landwirtschaft. Vom IAP wurde auf dieser Basis ein Synthesebericht vorgelegt, der vor allem die Chancen zukünftiger Forschung und Innovationen für Ernährungssicherung und Landwirtschaft herausarbeitet (IAP 2018).

Die verschiedenen Initiativen zeigen übereinstimmend, dass erhebliche Forschungsanstrengungen zum Agrar- und Ernährungssystem notwendig sind, um gegenwärtige Probleme und zukünftige Herausforderungen zu meistern. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass erhebliche Innovationspotenziale bestehen, insbesondere durch den rapiden Fortschritt in den Biowissenschaften (IAP 2018). Eine wesentliche Herausforderung bleibt jedoch die Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse und darauf basierender technischer Innovationen in die Praxis. Wie oben aufgezeigt, bestehen die Probleme des Agrar- und Ernährungssystem auch deswegen, weil Innovationen nur unzureichend umgesetzt werden. Dies gilt einerseits für Entwicklungsländer, wo Probleme der Marktentwicklung und die mangelnde Kapazität staatlicher Institutionen, wie etwa der Landwirtschaftsberatung, dazu beitragen, dass Landwirte sowohl wenig Zugang zu Innovationen haben als auch wenig Möglichkeiten und Anreize, diese umzusetzen. Die tiefer liegende Ursache dieser Probleme ist oft der fehlende politische Wille der Regierungen, die Land- und Ernährungswirtschaft angemessen zu unterstützen (BIRNER et al. 2018). Andererseits werden aber auch in Industrieländern Innovationen im Agrar- und Ernährungssystem nur teilweise umgesetzt, wobei hier vor allem Probleme im Bereich des Umwelt- und Tierschutzes ungelöst bleiben. Die Situation in Deutschland verdeutlicht diese Problematik sehr eindrücklich. Verschiedene wissenschaftliche Beiräte des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft haben in umfangreichen Gutachten nachgewiesen, dass es nicht nur notwendig, sondern mit verfügbaren Produktionsverfahren durchaus möglich ist, die Landwirtschaft in Deutschland weitaus umwelt-, tier- und klimafreundlicher zu gestalten, als sie heute praktiziert wird.⁵ Wesentliche Fortschritte in dieser Hinsicht wurden jedoch kaum erzielt, obwohl ein erheblicher gesellschaftlicher Druck besteht, diese Probleme zu lösen.⁶

5 Siehe WBA et al. 2013, WBA 2015, WBAE und WBW 2016.

6 Beispiele dafür sind die jährlich anlässlich der Grünen Woche in Berlin stattfindenden Demonstrationen mit dem Titel „Wir haben es satt“ (<https://www.wir-haben-es-satt.de/>) oder das Volksbegehren „Rettet die Bienen“ in Bayern (siehe <https://volksbegehren-artenvielfalt.de/>).

Vor diesem Hintergrund geht der vorliegende Artikel der Frage nach, warum der Beitrag der wissenschaftlichen Forschung zur Lösung der Probleme des Agrar- und Ernährungssystems nur unzureichend genutzt wird. Dazu wird das Konzept der „Governance“ herangezogen, wobei der Begriff *Governance* hier im Sinne von „Steuerung“ verwendet wird.⁷

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut. Im nächsten Abschnitt werden die wesentlichen Probleme der Ernährung und die Chancen für die Ernährungsforschung herausgestellt. Abschnitt 3 befasst sich mit den Umweltproblemen der Landwirtschaft und den Chancen für die Agrarforschung. Im vierten Abschnitt wird ein Analyserahmen vorgestellt, der auf dem Konzept der *Governance* beruht. Auf dieser Basis werden die Steuerungsprobleme des Marktes und des politischen Systems behandelt, die zu den beobachteten Problemen führen. Hier wird die Situation in Deutschland behandelt, die teilweise auch für andere europäische Länder als exemplarisch betrachtet werden kann. Im Abschnitt 5 werden Schlussfolgerungen gezogen.

2. Probleme der Ernährung und Chancen für die Ernährungsforschung

In diesem Abschnitt werden zunächst die globalen Probleme der Ernährung skizziert, bevor auf die europäische Perspektive eingegangen wird.

2.1 Die globale Ernährungssituation

Global betrachtet ist die Ernährungssituation vom Problem der „dreifachen Last“ der Fehlernährung (*triple burden*) gekennzeichnet. Wie in der Einleitung ausgeführt, liegt die Zahl der Menschen, die weltweit an Hunger (d. h. Mangel an ausreichender Kalorienversorgung) leiden, weiterhin bei über 800 Millionen. Nach dem letzten Bericht der zuständigen UN-Organisationen zur globalen Ernährungssicherung stieg die Zahl der hungernden Menschen von 784 Millionen im Jahr 2013 auf geschätzte 821 Millionen im Jahr 2017, während der Prozentsatz der von Hunger betroffenen Menschen von 10,5% im Jahr 2015 auf geschätzte 10,9% im Jahr 2017 stieg.⁸ Damit ist eine Trendwende zu beobachten, da in den Jahrzehnten zuvor die Zahl und der Prozentsatz der hungernden Menschen kontinuierlich gefallen war. Der höchste Anteil der von Hunger betroffenen Menschen lebt in Afrika (20%), während die größte Anzahl weiterhin in Asien lebt (515 Millionen).⁹ Die Zahl der Menschen, die an Mikronährstoffmangel (d. h. „verstecktem Hunger“) leiden, wird auf über zwei Milliarden Menschen geschätzt, wobei auch hier in Afrika der größte Prozentsatz und in Asien die größte Anzahl an Menschen betroffen sind.¹⁰ Um nur ein Beispiel für Mikronährstoffmangel herauszugreifen: Weltweit wird die Zahl der schwangeren Frauen, die an Eisenmangel (Anämie) leiden, auf ca. 40% geschätzt.¹¹ Das dritte Problem

7 Der Begriff „Governance“ leitet sich aus dem lateinischen Begriff *gubernare* (steuern) ab. Der englische Begriff *Governance* ist mittlerweile auch in der deutschsprachigen wirtschafts- und politikwissenschaftlichen Literatur weit verbreitet (siehe BENZ et al. 2007).

8 FAO et al. 2018, S. 3.

9 FAO et al. 2018, S. 4–6.

10 GÖDECKE et al. 2018, S. 24.

11 *Development Initiatives* 2018, S. 31.

der Fehlernährung ist Übergewicht bzw. Adipositas (krankhaftes Übergewicht).¹² Die verfügbaren Zahlen lassen darauf schließen, dass mittlerweile weltweit ebenfalls über zwei Milliarden Menschen übergewichtig sind und davon 678 Millionen an Adipositas leiden.¹³ Ungesunde Ernährung, die zu Übergewicht und Adipositas führt, gilt als einer der vier wichtigsten Risikofaktoren für nicht übertragbare Krankheiten (z. B. Herz- und Kreislauf-erkrankungen oder Diabetes), die 2016 mehr als 70% aller krankheitsbedingten Todesfälle weltweit ausmachten.¹⁴ Diese Zahlen belegen, welche große Herausforderung darin besteht, das zweite globale Nachhaltigkeitsziel der Vereinten Nationen zu erreichen, das vorsieht, alle anderen Formen von Fehlernährung bis 2030 auszurotten.¹⁵

2.2 Die Ernährungssituation in Europa

Die Ernährungssituation in Europa ist vor allem durch das Problem des Übergewichts geprägt, von dem 52% der Bevölkerung betroffen ist. Unter Adipositas leiden EU-weit 16% der Bevölkerung, wobei die Werte von 9% in Rumänien bis 26% in Malta reichen.¹⁶ Mit Übergewicht und Adipositas und den damit verbundenen Krankheitsrisiken sind hohe Kosten für die Gesundheitssysteme verbunden. Gleichzeitig gibt es aber auch in Europa weiterhin Menschen, die sich keine ausreichende Menge an Nahrungsmitteln leisten können. Hilfsorganisation im Vereinigten Königreich sowie in Frankreich, Spanien und Griechenland berichten über eine Zunahme der Menschen, die Nahrungsmittelhilfe in Anspruch nehmen. Das Problem ist auch in Osteuropa verbreitet, wobei sich allerdings die Lage dort in den letzten Jahrzehnten generell verbessert hat.¹⁷ Auch gibt es eine Reihe von Ländern in Europa, in denen sowohl Übergewicht als auch Unterernährung und Mangel an Mikronährstoffen (versteckter Hunger) ein relevantes Problem darstellen. Daher ist die „dreifache Last der Fehlernährung“ (*triple burden of malnutrition*) auch in Europa ein Problem.

Eine detaillierte Beurteilung der Ernährungssituation in Europa bleibt jedoch schwierig, da es nach Einschätzung des *European Academies Science Advisory Council* (EASAC) europaweit keine ausreichende Datengrundlage gibt.¹⁸ Anders als etwa in den USA werden in Europa nämlich bislang keine regelmäßigen Untersuchungen zur Verbreitung von Ernährungsproblemen auf Haushaltsebene durchgeführt. Auch für Deutschland kann die Datenlage als problematisch eingestuft werden, da die Zeitabstände zwischen bundesweiten Erhebungen zum Nahrungsmittelverzehr relativ lang sind und für Risikogruppen, wie z. B. Schwangere und Kleinkinder, nur begrenzte Daten vorliegen.¹⁹ Dennoch gibt es eindeutige

12 Grundlage für die Einteilung ist eine Klassifikation der Weltgesundheitsorganisation (WHO), die auf dem Körpermassenindex (*Body Mass Index*) beruht. Dieser ist definiert als Quotient aus Gewicht und Körpergröße zum Quadrat. Übergewichtig gelten Menschen mit einem Körpermassenindex über 25. Für Adipositas gilt 30 als Schwellenwert (*WHO* 2000, S. 9).

13 *Development Initiatives* 2018, S. 31.

14 *Development Initiatives* 2018, S. 31.

15 Siehe <https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/>.

16 *EASAC* 2017, S. 7.

17 *EASAC* 2017, S. 8.

18 *EASAC* 2017, S. 15.

19 Eine sehr detaillierte Einschätzung der Datenlage zur Ernährung in Deutschland findet sich im Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz (WBAE) „Politik für eine nachhaltigere Ernährung“, das voraussichtlich 2019 veröffentlicht wird.

Hinweise darauf, dass Kinder in Haushalten mit niedrigem Einkommen im Hinblick auf die Ernährung benachteiligt sind, was gravierende Auswirkungen auf ihre körperliche und kognitive Entwicklung haben kann. Zudem kritisieren Ernährungsexperten, dass die Ansätze in der Sozialhilfe für die Ernährung von Kindern zu gering sind, um eine hochwertige Ernährung zu gewährleisten (ELLSÄSSER et al. 2002, FRANK und BIESALSKI 2018).²⁰ In der öffentlichen Wahrnehmung und auch im politischen Raum findet dieses Problem allerdings nur wenig Beachtung (PFEIFFER 2014).

Für die Forschung ergeben sich aus dieser Analyse unterschiedliche Chancen. Zunächst ist es geboten, durch Investitionen in eine regelmäßige und umfassende Datenerfassung eine bessere Grundlage für die Analyse der Ernährungssituation und der Entwicklungstrends zu schaffen. Wesentliche Forschungsschwerpunkte, die das EASAC identifiziert hat, beziehen sich darauf, die Gründe für die Wahl von Ernährungsmustern besser zu verstehen und wirksame Strategien zu identifizieren, mit denen eine gesündere und nachhaltigere Ernährung erreicht werden kann, wobei sowohl Gesundheits- als auch Umweltaspekte zu beachten sind. Eine Chance wird hier in innovativen Ansätzen, wie etwa dem „Nudging“ (REISCH et al. 2017) und der Nutzung von Ernährungs-Apps gesehen (FLAHERTY et al. 2017, HOLZMANN et al. 2017), wobei hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Auch ist Forschung zu der Frage notwendig, wie das Agrar- und Ernährungssystem insgesamt besser auf eine nachhaltige Ernährung ausgerichtet werden kann.²¹ Auf Grund der oben genannten Problematik sollte auch die Erforschung der Ernährungsproblematik bei vulnerablen und sozial benachteiligten Gruppen besondere Beachtung finden.

2.3 Auswirkungen des EU-Handels mit Nahrungsmitteln auf die Welternährung

Auf Grund der bestehenden globalen Handelsbeziehungen ist die Ernährungssituation in Europa eng mit der globalen Ernährungssituation verbunden. Vor diesem Grund stellt sich die Frage der Verantwortung Europas für die Welternährung. Im Mittelpunkt der Debatte um diese Frage stehen die Handelsbeziehungen, die wissenschaftlich und gesellschaftlich umstritten sind. Einerseits wird gefordert, dass Europa eine hohe Nahrungsproduktion anstreben und Nahrungsmittel exportieren sollte, um damit zur Versorgung in Ländern mit Nahrungsmittelknappheit beizutragen. Auch könne damit das globale Niveau der Nahrungsmittelpreise reduziert werden. Andererseits werden Nahrungsexporte in Entwicklungsländer kritisch gesehen, weil sie die Anreize für lokale Nahrungsmittelproduktion reduzierten, wovon überwiegend Kleinbauern betroffen seien.²²

Empirisch ist festzustellen, dass sich die Europäische Union zwischen 2007 und 2017 von einer Importregion für Nahrungsmittel mit einem relativ geringen Handelsdefizit zu einer Exportregion mit einem relativ geringen Handelsüberschuss entwickelt hat.²³

20 Im Jahr 2018 lag der Harz-IV-Satz für Ernährung pro Tag bei 2,67 Euro für Kinder im Alter von 0–5 Jahren und bei 3,92 Euro für Kinder im Alter von 6–14 Jahren.

(Siehe <https://www.hartziv.org/wp-content/uploads/kinderregelsatz2018.jpg>).

21 EASAC 2017, S. 2.

22 Siehe GIZ 2013 für einen Überblick zu der Debatte. Zur Frage der Nahrungsmittelpreise in Entwicklungsländern, siehe SWINNEN 2011. Kritische Stimmen finden sich im „Kritischen Agrarbericht“, der jährlich vom Agrarbündnis e. V. herausgegeben wird. Siehe z. B. REICHERT 2019.

23 *European Commission* 2018a, S. 3.

Deutschland hat beim Handel von Agrargütern mit Nicht-EU-Staaten hingegen seit Jahren ein erhebliches Handelsdefizit, wobei vor allem tropische Produkte importiert werden, während tierische Produkte beim Export eine wichtige Rolle einnehmen. In letzter Zeit ist vor allem der Export tierischer Produkte nach Afrika (Milchpulver, Hähnchenteile) in die öffentliche Kritik geraten. Insgesamt beträgt der Anteil der Agrarexporte der EU in die Länder Afrikas südlich der Sahara allerdings weniger als 7% aller Agrarexporte in Nicht-EU-Länder.²⁴ Studien der Deutschen Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) zeigen, dass die Auswirkungen von Nahrungsexporten nach Afrika sehr differenziert betrachtet werden müssen, da sowohl positive Auswirkungen (z. B. Zugang von ärmeren Haushalten zu günstigen Proteinquellen) als auch negative Auswirkungen (z. B. Beeinträchtigung der lokalen Produktion) auftreten können. Die Effekte sind stark von der Agrarstruktur der Importländer und deren eigener Handelspolitik beeinflusst (GIZ 2018a, b).

Ähnlich umstritten wie die Nahrungsexporte in Entwicklungsländer sind auch Importe von Nahrungsmitteln bzw. Futtermitteln aus Entwicklungsländern nach Europa bzw. Deutschland. Hier wird einerseits argumentiert, dass Exporte wichtige Einkommensmöglichkeiten für kleinbäuerliche Haushalte schaffen würden und damit auch zur Ernährungssicherung beitragen können. Andererseits bestehen Bedenken, dass bei der Produktion der Nahrungsmittel in Entwicklungsländern Umwelt- und Sozialstandards nicht eingehalten bzw. Bauern von ihrem Land vertrieben werden, wenn die Agrarproduktion für den Export durch Großbetriebe erfolge, womit negative Auswirkungen auf die Ernährungssicherung verbunden wären. Auch hier ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich, da je nach Agrarstruktur und Agrarpolitik der exportierenden Länder sowohl positive als auch negative Wirkungen im Hinblick auf die Ernährungssicherung auftreten können.²⁵

Vor dem Hintergrund der Debatte und der Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung kommt EASAC zu dem Schluss, dass hier erheblicher Forschungsbedarf besteht. Insbesondere wird vorgeschlagen, Handelsflüsse und Netzwerke zu untersuchen, um besser zu verstehen, wie sich der Handel entwickelt, auf welchen natürlichen Ressourcen er beruht und wie Transport und Logistik die Bewegung von Kalorien und Proteinen rund um den Globus beeinflussen.²⁶ Hier könnte man anschließen, dass auch die Auswirkungen des Handels mit Agrarprodukten auf die Versorgungslage mit Mikronährstoffen weiter untersucht werden müssen. EASAC schlägt außerdem verstärkte Forschung zu den Auswirkungen des Handels auf die Volatilität der Nahrungspreise vor. Auch diese Frage steht unter dem Motto „Spekulation mit Nahrungsmitteln“ im Mittelpunkt einer gesellschaftlichen Debatte.²⁷

3. Umweltprobleme der Landwirtschaft und Chancen für die Agrarforschung

In diesem Abschnitt werden zunächst die Umweltprobleme der Landwirtschaft skizziert. Auf dieser Basis werden Lösungsstrategien diskutiert, wobei insbesondere der Beitrag der Forschung zur Problemlösung beleuchtet wird.

24 *European Commission* 2018b, S. 2.

25 Siehe z. B. VAN DEN BROECK und MAERTENS 2016.

26 *EASAC* 2017, S. 27.

27 Zu den Argumenten der Kritiker, siehe zum Beispiel *Foodwatch* 2011.

3.1 Umweltprobleme der Landwirtschaft

Wie in der Einleitung angedeutet, stellen die Umweltprobleme, die bei der Erzeugung von Nahrungsmitteln auftreten, eine große Herausforderung dar. Dies wird eindrucksvoll in dem EASAC-Bericht für Europa und in dem IAP-Bericht für die globale Situation belegt (EASAC 2017, IAP 2018).

Für die Analyse der Umweltwirkungen der Landwirtschaft wird auch das Konzept der „planetarischen Grenzen“ (ROCKSTRÖM et al. 2009) herangezogen. Die Landwirtschaft wird als Hauptursache dafür angesehen, dass bei den folgenden vier der neun planetaren Grenzen die Stufe des hohen oder steigenden Risikos erreicht ist (CAMPBELL et al. 2017):

- (1.) *Landnutzungswandel*: Es wird geschätzt, dass zwischen 2000 und 2010 die Umwandlung von Wald in Ackerflächen der Grund für 80 % der weltweiten Entwaldung war.
- (2.) *Wasserverbrauch*: Etwa 70 % des globalen Wasserverbrauchs entfällt auf die Landwirtschaft, und sie trägt erheblich zur Übernutzung der Süßwasserressourcen bei.
- (3.) *Biochemische Kreisläufe*: Der Düngemittelverbrauch in der Landwirtschaft nimmt etwa 85 % des globalen Stickstoffverbrauchs und etwa 90 % der globalen Phosphatproduktion in Anspruch.
- (4.) *Unversehrtheit der Biosphäre*: Der Beitrag der Landwirtschaft zum Verlust an Biodiversität wird auf etwa 80 % geschätzt (CAMPBELL et al. 2017).

Auch bezüglich der weiteren planetaren Grenzen nimmt die Landwirtschaft eine problematische Rolle ein. Der Beitrag der Agrar- und Ernährungssysteme zu den globalen *Treibhausgasemissionen* wird auf etwa 25 % geschätzt. Auch ist nachgewiesen, dass die Landwirtschaft einen nicht unerheblichen Anteil an der Versauerung der Meere, dem stratosphärischen Ozonabbau und der atmosphärischen Aerosolbelastung hat (CAMPBELL et al. 2017).

Um die Gründe für die Umweltwirkungen der Landwirtschaft besser zu verstehen, ist es sinnvoll, zwischen intensiven und extensiven Systemen der Landnutzung zu unterscheiden, wobei sich der Begriff „Intensität“ auf die Menge der Produktionsfaktoren Arbeit und Kapital bezieht, die je Einheit (Hektar) Boden eingesetzt werden. Nach der Theorie der induzierten Innovation steigt die Intensität mit steigender Bevölkerungsdichte an.²⁸ Daher finden sich die intensiven Systeme der Landnutzung überwiegend in Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte, vorwiegend in Europa und Asien, während extensive Systeme in Afrika, Australien und in Regionen Amerikas mit geringer Bevölkerungsdichte vorherrschen.²⁹

Intensive und extensive Systeme der Landnutzung sind von sehr unterschiedlichen Umweltproblemen geprägt.³⁰ In intensiven Systemen werden hohe Mengen an mineralischem und organischem Dünger eingesetzt. Umweltprobleme ergeben sich dabei vor allem durch Nährstoffüberschüsse, die entstehen, wenn die Düngermengen über dem Nährstoffbedarf

28 Die Theorie der induzierten Innovation gilt international seit den 1970er Jahren als die Standardtheorie der landwirtschaftlichen Entwicklung (HAYAMI und RUTTAN 1971). Ähnliche Erklärungsansätze finden sich allerdings schon in der von dem deutschen Agrarökonom Friedrich AEREBOE (1917) entwickelten Intensitätslehre und in der Theorie der landwirtschaftlichen Entwicklung der dänischen Agrarökonomin Ester BOSERUP (1965).

29 Eine Klassifikation der landwirtschaftlichen Systeme der Entwicklungsländer wurde von der FAO erstellt: Siehe http://www.fao.org/farmingsystems/regions_en.htm.

30 Für einen Überblick siehe FAO 2015a, S. 64.

der Nutzpflanzen liegen. Diese Nährstoffüberschüsse belasten die Gewässer und führen, insbesondere bei unsachgemäßer Ausbringung von Dünger, zu erheblichen Treibhausgasemissionen. Nährstoffüberschüsse lassen sich durch gute fachliche Praxis vermeiden, sie stellen jedoch ein weltweit verbreitetes Problem in intensiven Landnutzungssystemen dar. Wie in Abschnitt 4 weiter erläutert, ist dieses Problem auch in Deutschland von gravierender Bedeutung (*WBA* et al. 2013, *WBAE* und *WBW* 2016). Die Lösung des Problems der Überdüngung verdient hohe Priorität, da beim Stickstoff- und Phosphorkreislauf bezüglich der planetaren Grenzen bereits die Stufe des hohen Risikos erreicht ist (*ROCKSTRÖM* et al. 2009).

Ein weiteres Problem der intensiven Landwirtschaft ist der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel, der bei unsachgemäßer Ausbringung zu Gefährdungen der menschlichen Gesundheit und der Umwelt (Belastung der Gewässer, Beeinträchtigung der Biodiversität) führt. In der Europäischen Union (EU) wird diese Problematik durch eine strenge Regulierung eingegrenzt. Dennoch sind gerade chemische Pflanzenschutzmittel gesellschaftlich umstritten, was etwa die Diskussion um Glyphosat belegt. In Entwicklungsländern steigt der Verbrauch an Pflanzenschutzmitteln stark an (*HAGGBLADE* et al. 2017). Auf Grund von Defiziten in der Regulierung und im Training der Landwirte sind die Auswirkungen oft sehr problematisch.³¹ Weitere Umweltprobleme der intensiven Landnutzungssysteme betreffen die Bewässerung. In bewässerten Systemen kommt es oft zur Übernutzung der Wasserressourcen und zur Versalzung von Böden (*IAP* 2018).

Ein weiteres Umweltproblem, das sowohl in intensiven als auch in extensiven Systemen auftritt, ist die Bodenerosion. Während die Erosionsraten in extensiven Systemen weiterhin sehr hoch sind, wurden in einigen der intensiv genutzten Regionen in den letzten Jahrzehnten erhebliche Verbesserungen erzielt, insbesondere durch Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung, bei denen auf das Pflügen verzichtet wird.³² Ein Problem, das vor allem in extensiven Systemen auftritt, ist der Verlust an Bodenfruchtbarkeit durch unzureichende Nährstoffzufuhr, was vor allem in Afrika ein weitreichendes Problem darstellt (*TULLY* et al. 2015).

Ein Umweltproblem der Landwirtschaft, das ebenfalls einer dringenden Lösung bedarf, ist der Verlust an Biodiversität, denn bei diesem Problem ist, so wie beim Stickstoff- und Phosphorkreislauf, bereits die Stufe des hohen Risikos erreicht (*ROCKSTRÖM* et al. 2009). Der Verlust an Biodiversität ist eng mit der Intensivierung von Landnutzungssystemen verbunden, jedoch führt auch die Ausweitung des Ackerbaus in extensiv genutzten Regionen zu einem Verlust an Biodiversität, etwa durch die Umwandlung von Savannen in Ackerland (*DUDLEY* und *ALEXANDER* 2017).

Wenn keine Umsteuerung erfolgt, werden sich die Umweltprobleme der Landwirtschaft noch verschärfen, da die Produktion in den nächsten Jahrzehnten noch erheblich gesteigert werden muss, um die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren. Die FAO schätzt, dass bei Fortschreibung der gegenwärtigen Trends die Nahrungsmittelproduktion im Jahr 2050 um etwa 60 % höher sein muss als im Zeitraum 2005–2007, um die Nachfrage nach Nahrungsmitteln zu decken.³³ Die prognostizierte Steigerung der Nachfrage ist allerdings nicht nur auf die steigende Bevölkerung zurückzuführen, sondern auch darauf, dass mit

31 Siehe z. B. *SANKOH* et al. 2016.

32 *FAO* 2015a, S. 108.

33 *ALEXANDRATOS* und *BRUINSMA* 2012, S. 7. Die Problematik dieser Schätzung wird von den Autoren ausführlich diskutiert.

steigendem Einkommen die Nachfrage nach Fleisch überproportional ansteigt. Dieser Trend ist weltweit zu beobachten (FAO 2015b).

3.2 Nachhaltige Intensivierung als Lösungsansatz

Um eine Steigerung der Nahrungsmittelproduktion unter Berücksichtigung der planetaren Grenzen bewältigen zu können, wird auf internationaler und auch auf europäischer Ebene das Konzept der „nachhaltigen Intensivierung“ vertreten (GARNETT et al. 2013, WILLIAMS et al. 2017). Dieses Konzept geht davon aus, dass eine Steigerung der Flächenerträge notwendig ist, um eine nachhaltige Steigerung der Agrarproduktion zu erzielen, da eine Ausweitung der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus Gründen des Umwelt- und Klimaschutzes vermieden werden sollte. Das Konzept sieht aber nicht vor, dass Produktionssteigerungen gleichermaßen in allen Produktionssystemen erfolgen, sie sollen vielmehr an die lokalen Standortbedingungen angepasst sein. Aus Umweltschutzgründen kann es durchaus notwendig sein, an sehr intensiv genutzten Standorten die Produktionsintensität zu reduzieren, um Umweltziele zu erreichen. Zudem ist das Konzept der nachhaltigen Intensivierung offen für verschiedene landwirtschaftliche Praktiken, also sowohl für den konventionellen als auch für den ökologischen Landbau. Die relativen Vorzüge eines Produktionsverfahrens sind nach dem Konzept der nachhaltigen Intensivierung standortspezifisch auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse zu bewerten (GARNETT et al. 2013).

Das Konzept der nachhaltigen Intensivierung impliziert, dass die Steigerung der Flächenerträge vor allem durch eine Erhöhung der Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel, insbesondere von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln sowie von Bewässerungswasser, erzielt werden muss und nicht etwa nur durch eine Erhöhung des Einsatzes dieser Betriebsmittel. Dies gilt insbesondere für die intensiven Systeme der Landbewirtschaftung, die bereits durch einen hohen Einsatz von Betriebsmitteln gekennzeichnet sind. Eine verbesserte Effizienz kann vor allem durch gute landwirtschaftliche Praxis (Vermeidung von Überdüngung) sowie durch wissenschaftlich-technischen Fortschritt erzielt werden, insbesondere (wie unten weiter erläutert) durch Innovationen im Bereich der Pflanzen- und Tierzucht, im Pflanzenschutz und in der Landtechnik. Bei einer globalen Betrachtung wurden in den letzten Jahrzehnten in dieser Hinsicht bereits erhebliche Fortschritte erzielt, da seit den 1990er Jahren die Steigerung der Effizienz zur wichtigsten Quelle des Wachstums der globalen Agrarproduktion geworden ist, während bis in die 1980er Jahre die Steigerung der Agrarproduktion vor allem durch eine Erhöhung des Betriebsmitteleinsatzes erreicht wurde.³⁴

In Anblick der oben aufgeführten Umweltprobleme bleiben jedoch weiterhin große Herausforderungen bestehen. Daher kommt es darauf an, neue Chancen zu nutzen, mit denen die Agrarforschung zur nachhaltigen Ernährungssicherung beitragen kann. Eine neue Chance besteht in der Anwendung neuer Methoden der Genom-Editierung, insbesondere durch CRISPR/Cas (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats-associated*). Im Pflanzenbau bietet diese Methode zum Beispiel neue Möglichkeiten der Züchtung auf Krankheitsresistenz und Trockentoleranz, und auch in der Tierproduktion und in der Aquakultur werden weitreichende Einsatzmöglichkeiten für die neuen Verfahren gesehen

34 FUGLIE 2015. In der Agrarökonomie wird die Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel gemessen als die Produktivität der drei Produktionsfaktoren Boden, Arbeit und Kapital (*Total Factor Productivity*).

(BARRANGOU und DOUDNA 2016, EASAC 2017). Diese Verfahren sind jedoch in Europa gesellschaftlich umstritten. Im Juli 2018 entschied der Europäische Gerichtshof, dass die neuen Technologien der Genom-Editierung unter die Richtlinie 2001/18/EG über die absichtliche Freisetzung genetisch veränderter Organismen in die Umwelt fallen und damit wie gentechnisch veränderte Organismen (GVOs) zu behandeln sind. Da GMOs in der EU strengen Regulierungen unterliegen und in der Landwirtschaft praktisch nicht genutzt werden, bleibt unklar, ob das Potenzial der Genom-Editierung in Europa in Zukunft genutzt werden kann, zumal zivilgesellschaftliche Gruppen dieser Technik kritisch gegenüberstehen (siehe Abschnitt 4). Vor diesem Hintergrund hat der Bioökonomierat ein neues Gentechnikrecht für die EU gefordert, das auf einer differenzierten Betrachtung dieser Technologie und ihrer Anwendungsgebiete beruht (*Bioökonomierat* 2019). Neben der Genom-Editierung lassen aber auch weitere Züchtungsverfahren, die auf statistischen Methoden wie der genomischen Selektion beruhen und gesellschaftlich weniger umstritten sind, einen gesteigerten Züchtungsfortschritt erwarten, und zwar sowohl in der Pflanzenproduktion (CROSSA et al. 2017) als auch in der Tierproduktion (HAYES et al. 2013).

Neben züchterischen Maßnahmen liegt auch in den Verfahren des Pflanzenschutzes ein hohes Potenzial für die nachhaltige Intensivierung. Hier besteht die besondere Herausforderung darin, Verfahren zu entwickeln, die einerseits einen effektiven Schutz der Nutzpflanzen vor Krankheiten, Schädlingen und Unkrautdruck gewährleisten, aber andererseits keine Gefährdung für Umwelt und die menschliche Gesundheit darstellen. Diese Herausforderung wird im EASAC-Bericht als unvermeidlicher „Balance-Akt“ bezeichnet.³⁵ Große Chancen werden im Bereich des biologischen Pflanzenschutzes gesehen (VAN LENTEREN et al. 2018).

Neue Chancen, die Umweltprobleme des Agrar- und Ernährungssystems zu lösen, liegen auch in der Anwendung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien bzw. in der Digitalisierung der Landwirtschaft (EASAC 2017). Hier gibt es ein weites Anwendungsfeld (DAUM 2019). Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die „Präzisionslandwirtschaft“, durch die Betriebsmittel wie Dünger, Saatgut und Pflanzenschutzmittel gezielter und daher effizienter eingesetzt werden können. Dies wird ermöglicht durch eine Kombination der Anwendung von GPS (*Global Positioning System*), Sensoren, Boden- und Ertragskarten sowie landwirtschaftlichen Geräten, die es z. B. ermöglichen, die Ausbringung von Dünger innerhalb eines Feldes je nach Ertragspotenzial zu variieren oder die Ausbringungsmenge für Pflanzenschutzmittel der Intensität des Krankheits-, Schädlings- oder Unkrautbefalls anzupassen. Die automatische Steuerung von Traktoren mit Hilfe von GPS ermöglicht ebenfalls eine genauere Ausbringung von Betriebsmitteln. Darüber hinaus werden in der Präzisionslandwirtschaft große Chancen für neue Verfahren der mechanischen Unkrautbekämpfung (als Alternative zu Herbiziden) gesehen. Dabei können auch „Flotten“ von kleinen selbstfahrenden Robotern eingesetzt werden (GONZALEZ-DE-SANTOS et al. 2017). Auch kann die Effizienz der Bewässerung durch den Einsatz von Präzisionsverfahren erhöht werden („Präzisionsbewässerung“). Obwohl viele Technologien der Präzisionslandwirtschaft schon seit Mitte den 1990er Jahren kommerziell vertrieben werden, blieben die Adoptionsraten sowohl in Europa als auch in den USA hinter den Erwartungen zurück, wofür mangelnde Rentabilität als ein wesentlicher Grund identifiziert wurde (PAUSTIAN und THEUVSEN 2017, SCHIMMELPFENNIG und EBEL 2016). Neue Entwicklungsmöglichkeiten für die Präzisionslandwirtschaft, mit denen möglicherweise die Rentabilität verbessert werden

35 EASAC 2017, S. 57.

kann, werden durch die Vernetzung und Nutzung großer Datenmengen (*big data*) möglich (WOLFERT et al. 2017). Für diese Entwicklung wird in Analogie zum Konzept „Industrie 4.0“ auch der Begriff „Landwirtschaft 4.0“ verwendet.

Digitale Technologien haben nicht nur im Pflanzenbau, sondern auch in der Tierhaltung ein hohes Potenzial, die Effizienz der Produktion zu verbessern. Gleichzeitig können sie zum Tierwohl beitragen, z. B. durch Sensor-gestützte Tierbeobachtung. In der Milchviehhaltung hat auch die zunehmende Verbreitung des Melkroboters und die damit ermöglichte Datenerfassung bereits dazu beigetragen, dass Methoden der „Präzisionstierhaltung“ zunehmend Anwendung finden (JOHN et al. 2016).

3.3 Nachhaltiger Konsum als Lösungsansatz

Neben dem Ansatz der nachhaltigen Intensivierung der Landwirtschaft stellt die Änderung des Ernährungsverhaltens eine weitere Strategie dar, die negativen Umweltwirkungen des Agrar- und Ernährungssystems zu begrenzen. In der Literatur besteht weitgehende Einigkeit darüber, dass vor allem eine Reduzierung des Konsums tierischer Produkte in Ländern mit hohem Verbrauchsniveau eine zielführende Strategie ist, um die Umweltwirkungen der Landwirtschaft im Hinblick auf Treibhausgasemissionen, Wasserverbrauch und Flächenverbrauch zu senken und dabei gleichzeitig positive Gesundheitswirkungen zu erzielen.³⁶ Wie weiter unten diskutiert, besteht die Herausforderung dieser Strategie darin, das Ernährungsverhalten der Bevölkerung durch politische Instrumente, die auch ökonomische Anreize beinhalten können, tatsächlich zu ändern. Eine weitere Strategie, die Effizienz des Agrar- und Ernährungssystems zu erhöhen, ist die Reduzierung von Nahrungsmittelverlusten entlang der gesamten Wertschöpfungsketten. Wie im EASAC-Report (2017) aufgeführt, gibt es dafür zahlreiche Ansatzpunkte, sowohl in der Verarbeitung und beim Handel als auch beim Verbraucherverhalten.

4. Governance-Probleme des Agrar- und Ernährungssystems

Wie aus den Ausführungen im letzten Abschnitt hervorgeht, bestehen im Agrar- und Ernährungssystem gravierende Probleme sowohl im Hinblick auf die Ernährungssituation als auch im Hinblick auf die Umweltwirkungen der Erzeugung von Nahrungsmitteln. Die Agrar- und Ernährungsforschung hat, wie oben dargelegt wurde, ein hohes Potenzial, zur Lösung dieser Probleme beizutragen. Jedoch werden die schon bestehenden Optionen nur unzureichend genutzt, durch Adoption von Innovationen und durch politische Steuerungsinstrumente zur Problemlösung beizutragen. Diese Schlussfolgerung gilt, wie oben gezeigt, nicht nur für die globale Ebene, sondern auch für Europa und für Deutschland. Nachfolgend wird exemplarisch am Beispiel Deutschlands analysiert, wie sich die paradoxe Situation erklären lässt, dass bestehende Optionen für eine nachhaltige Ernährungssicherung nur unzureichend genutzt werden. Dazu wird der in Abschnitt 4.2 beschriebene Analyserahmen verwendet, der auf dem Konzept der *Governance* beruht. Wie nachfolgend weiter erläutert, wird der Begriff *Governance* hier im Sinne von „Steuerung“ verwendet.

36 Siehe z. B. *WBAE* und *WBW* 2016, WILLETT et al. 2019.

4.1 Typen von Steuerungsmechanismen

Aus *Governance*-Perspektive lassen sich drei Typen von Steuerung unterscheiden:

- (1.) das Steuerungssystem des Marktes, das auf dem Wettbewerb privatwirtschaftlicher Unternehmen beruht;
- (2.) das Steuerungssystem des Staates, der durch vielfältige Maßnahmen auf das Marktgeschehen Einfluss nehmen kann; und
- (3.) das Steuerungssystem der Zivilgesellschaft, d.h. organisierter gesellschaftlicher Gruppen, die sowohl auf den Markt als auch auf den Staat Einfluss nehmen können.

In jedem der drei Sektoren sowie in deren Beziehungen untereinander können Steuerungsprobleme auftreten, die zu suboptimalen Ergebnissen führen. Steuerungsprobleme im Bereich des Marktes werden in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur als „Marktversagen“ bezeichnet. Analog dazu können Steuerungsprobleme des Staates auch als „Staatsversagen“ oder „Politikversagen“ bezeichnet werden. Probleme im Bereich der Zivilgesellschaft werden gelegentlich als „Gemeinschaftsversagen“ bezeichnet. Die Übertragung des Begriffs des Marktversagens auf Staat und Gesellschaft ist jedoch problematisch, da nicht immer ein völliges „Versagen“ eines Steuerungsmechanismus vorliegt, sondern Probleme mit unterschiedlich weitreichender Wirkung auftreten. Daher wird in diesem Analyserahmen der Begriff des „Steuerungsproblems“ verwendet.

4.2 Analyserahmen

Der Analyserahmen besteht aus vier Komponenten, die in Abbildung 1 dargestellt sind und nachfolgend näher erläutert werden.

Agrar- und Ernährungssystem: Im Zentrum des Analyserahmens steht das Agrar- und Ernährungssystem. Wie oben erläutert, umfasst es die Gesamtheit aller Wertschöpfungsketten für Nahrungsmittel. In Abbildung 1 sind die Komponenten des Ernährungssystems in den Boxen A–F dargestellt. Sie umfassen die landwirtschaftlichen Betriebe (Box B) sowie die vorgelagerte Industrie, die Betriebsmittel (z. B. Saatgut, Düngemittel und Pflanzenschutzmittel) liefert (Box A). Die nachgelagerten Bereiche umfassen die Lebensmittelverarbeitung (Box C), den Lebensmittelhandel (Box D) und die Gastronomie und Gemeinschaftsverpflegung (Box E). Die Verbraucher bzw. Bürger sind in Box F dargestellt. Box G beschreibt die Auswirkungen des Ernährungssystems in Bezug auf die verschiedenen Dimensionen der Nachhaltigkeit.

Politisch-administratives System: Die zweite Komponente des Analyserahmens ist das politisch-administrative System, das in der oberen Hälfte der Abbildung dargestellt ist. Es umfasst die diversen staatlichen Institutionen (Box H), die über verschiedene Politikinstrumente auf das Agrar- und Ernährungssystem Einfluss nehmen können. Auch die Institutionen der EU spielen für das Agrar- und Ernährungssystem eine wichtige Rolle. Wie in der Abbildung dargestellt, unterliegen die staatlichen Institutionen den Einflüssen durch die Akteure des Ernährungssystems. Eine Gruppe von Akteuren sind die in den verschiedenen Abschnitten der Wertschöpfungsketten tätigen Wirtschaftsunternehmen, einschließlich der Landwirte, die durch Lobby-Aktivitäten ihrer Verbände (Box I) Einfluss auf politische

Entscheidungen ausüben können. Eine weitere Gruppe von Akteuren sind die Verbraucherinnen und Verbraucher, die als Bürgerinnen und Bürger politisch Einfluss nehmen können, insbesondere durch Wahlen sowie durch Engagement in zivilgesellschaftlichen Gruppen (Box J) und politischen Parteien (Box K).

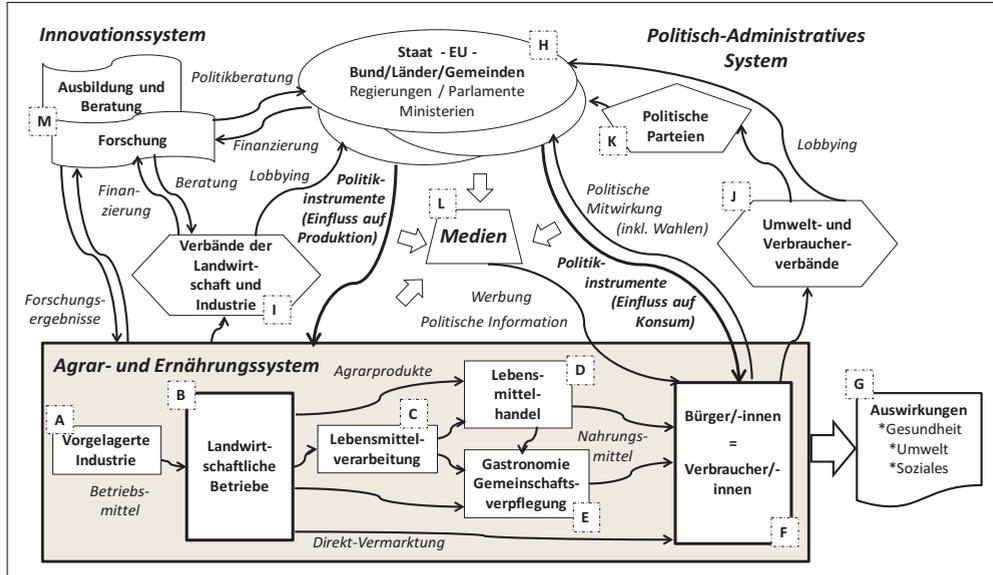


Abb. 1 Analyserahmen

Innovationssystem: Innovationen spielen, wie oben aufgeführt, eine wichtige Rolle für die Lösung der Probleme des Agrar- und Ernährungssystems. Daher beinhaltet der Analyserahmen auch das Innovationssystem, das als Netzwerk aller Akteure und Institutionen verstanden werden kann, die an der Entwicklung und Einführung von Innovationen beteiligt sind.³⁷ Die Institutionen der Forschung und der Ausbildung im Bereich der Agrar- und Ernährungswissenschaften sind als wesentliches Element des Innovationssystems als Box M in Abbildung 1 dargestellt.

Medien: Die Medien sind als eigene Komponente (Box L) in dem Analyserahmen aufgeführt, weil sie eine Schlüsselrolle für die Kommunikation verschiedener Akteure mit den Konsumenten bzw. Bürgern spielen. Sie stellen eine Plattform für die politische Auseinandersetzung über Agrar- und Ernährungspolitik dar, und sie sind auch ein Kanal, über den Erkenntnisse aus den Agrar- und Ernährungswissenschaften an die Produzenten und die Konsumenten vermittelt werden. Darüber hinaus nutzen die Verbände aus Industrie und Zivilgesellschaft die Medien als Mittel der politischen Kommunikation.³⁸

37 Zur Entwicklung und Definition dieses Konzepts, siehe LUNDVALL 2007. Zur Anwendung im Agrarbereich, siehe SPIELMAN und BIRNER 2008.

38 Aus Gründen der Übersichtlichkeit können nicht alle Verbindungen zwischen den Medien und den relevanten Akteuren in Form von individuellen Pfeilen dargestellt werden. Daher wurden in Abbildung 1 stattdessen Block-Pfeile verwendet.

4.3 Steuerungsprobleme des Marktes

Die Erzeugung von Nahrungsmitteln in den landwirtschaftlichen Betrieben ist eine privatwirtschaftliche Tätigkeit, die den Gesetzen des Marktes unterliegt. Die Umweltprobleme der Landwirtschaft, die im Abschnitt 3.1 beschrieben wurden, sind weitgehend auf negative externe Effekte der landwirtschaftlichen Produktion zurückzuführen, d. h. auf Effekte, bei denen der Markt- und Preismechanismus versagt. Dieses Problem umfasst gleichermaßen die Nitratbelastung des Grundwassers, die Treibhausgasemissionen der landwirtschaftlichen Produktion und den durch die Landwirtschaft bedingten Verlust an Biodiversität. Die negativen Effekte belasten die Allgemeinheit, aber die Kosten dafür fallen nicht beim Landwirt an, weshalb er sie bei seinen Produktionsentscheidungen nicht berücksichtigt. Neben externen Effekten ist auch das Problem des kollektiven Handelns eine wesentliche Ursache für die negativen Umweltwirkungen der Landwirtschaft. Dieses Problem besteht darin, dass der Einzelne keinen Anreiz hat, zu einem Gut beizutragen, das allen Mitgliedern einer Gemeinschaft zu Gute kommt, wenn kein Mechanismus besteht, der sicherstellt, dass alle Mitglieder ihren Beitrag leisten. Dieses Problem wird auch als „Trittbrettfahrer-Problem“ bezeichnet.³⁹ Auf Grund dieses Problems hat der einzelne Landwirt keinen Anreiz, höhere als die gesetzlich vorgeschriebenen Umweltstandards einzuhalten, denn dadurch hätte er höhere Kosten, kann aber nicht sicher sein, dass andere Landwirte ebenfalls nach höheren Umweltstandards produzieren. Landwirte haben jedoch prinzipiell die Möglichkeit, durch Produktdifferenzierung oder Erschließung von Nischenmärkten höhere Preise zu erzielen, was es ihnen ermöglicht, auch zu höheren Kosten umweltfreundlicher zu produzieren. Dies ist zum Beispiel durch Direktvermarktung möglich (siehe Pfeil B–F in Abb. 1) oder durch die unten weiter diskutierte Schaffung von Labels, wie dem Öko-Label.

Auch der Konsum von Nahrungsmitteln unterliegt dem Steuerungsmechanismus des Marktes. Prinzipiell könnten die Verbraucherinnen und Verbraucher durch ihr Konsumverhalten zu einem nachhaltigeren Agrar- und Ernährungssystem beitragen, indem sie umweltfreundlich erzeugte Nahrungsmittel nachfragen. Dazu müssten sie aber erst einmal verlässliche Informationen darüber haben, dass die Nahrungsmittel tatsächlich umweltfreundlich erzeugt sind. Da der Kunde in der Regel nicht selbst nachprüfen kann, wie ein Nahrungsmittel erzeugt worden ist, besteht hier das Problem der Informationsasymmetrie, das, wie AKERLOF (1970) nachgewiesen hat, zu Marktversagen führt. Die Umweltfreundlichkeit der Herstellung eines Lebensmittels wird aus informationsökonomischer Sicht als „Vertrauenseigenschaft“ bezeichnet (VON MEYER-HÖFER und SPILLER 2016). Durch Zertifizierungssysteme und Labels kann das Problem der Informationsasymmetrie solcher Eigenschaften gelöst werden, allerdings nur, wenn der Verbraucher Vertrauen in das Label und das damit verbundene Zertifizierungssystem entwickelt. Auch wenn es eine Vielzahl von Labels gibt, hat in Bezug auf die Umweltwirkungen der landwirtschaftlichen Produktion bislang nur das Bio-Label für ökologisch erzeugte Nahrungsmittel weite Verbreitung und hohe Bekanntheit gefunden. Dies liegt möglicherweise auch daran, dass dieses Label staatlich überwacht wird und Kunden gerade bei Nahrungsmitteln dazu neigen,

39 Siehe hierzu OLSON 1965 und OSTROM 1990. Dem Problem des kollektiven Handelns liegt das Menschenbild der neo-klassischen Ökonomie zu Grunde. Menschliches Verhalten wird erklärt, indem man annimmt, Menschen handeln so, dass sie ihren eigenen Nutzen maximieren.

mehr Vertrauen in staatlich garantierte Labels zu entwickeln.⁴⁰ Bei dem Bio-Label handelt es sich um ein einstufiges Label. Mehrstufige Labels hätten den Vorteil, differenzierter auf die Zahlungsbereitschaft verschiedener Kundengruppen reagieren zu können. Vor diesem Hintergrund haben verschiedene Beiräte des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft die Einführung mehrstufiger „Dachlabels“ für die Bereiche Gesundheit, Umwelt und Klima, Soziales und Tierschutz gefordert (*WBVE* und *WBA* 2011).

Die Verwendung von Labels kann jedoch ein weiteres Problem nicht lösen, das beim Kauf umweltfreundlich erzeugter Nahrungsmittel auftritt: Auf Seite des Verbrauchers besteht ebenfalls das oben aufgeführte Problem des kollektiven Handelns. Die Bereitschaft, freiwillige Instrumente wie Labels zu nutzen, ist dadurch eingeschränkt, dass der Verbraucher mit seinem eigenen Kaufverhalten nur einen geringen Beitrag zum Gesamtproblem leisten kann und es keinen Mechanismus gibt, der sicherstellen würde, dass andere Verbraucher ebenfalls ihren Beitrag leisten. Hinzu kommen weitere Hindernisse, wie etwa die Transaktionskosten, die entstehen, weil Verbraucher Zeit aufwenden müssen, um sich über die Labels zu informieren (BIRNER et al. 2002). In einer 2018 durchgeführten Umfrage gab mehr als die Hälfte der Verbraucher an, dass sie bei vielen Angaben auf Lebensmitteln „nicht mehr durchblicken“,⁴¹ was auf hohe Informationskosten hinweist.

Diese Herausforderungen tragen sicherlich dazu bei, dass Labels im Gesamtumsatz der Ernährungsindustrie bislang immer noch eine untergeordnete Rolle spielen. 2017 lag der Anteil von Öko-Ware am Gesamtumsatz des Lebensmittelhandels in Deutschland bei 5%.⁴² Die Bereitschaft der Verbraucherinnen und Verbraucher, Öko-Ware zu kaufen, unterscheidet sich auch stark zwischen den Produkten. 2018 lag der Anteil der Einkaufsmenge für Öko-Produkte z. B. bei 12,6% für Eier, bei 4,1% für Brot und bei 1,3% für Geflügelfleisch.⁴³ In Anbetracht der begrenzten Nachfrage ist auch der Anteil der Betriebe, die ökologisch wirtschaften, begrenzt. 2017 betrug der Anteil der ökologisch zertifizierten landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland 11% und der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Fläche etwa 8%.⁴⁴

Die Herausforderungen, die bei der Nutzung von Umwelt-Labels bestehen, treffen auch für Sozial-Labels zu. Das bekannteste Sozial-Label in Deutschland ist FairTrade. Auch hier liegt der Anteil an den Einkaufsmengen in einem Bereich, der mit dem Öko-Label vergleichbar ist. 2017 betrug der FairTrade-Anteil bei Kaffee 4%, bei Kakao 8% und bei Bananen 12%. Ein hoher Anteil der FairTrade-Ware ist gleichzeitig für Öko-Produktion zertifiziert.⁴⁵

Marktversagen spielt auch eine Rolle für die Probleme, die bezüglich der Ernährungssituation auftreten. Eine der Ursachen für das Problem des Übergewichts wird darin gesehen, dass verarbeitete Lebensmittel oft hohe Mengen an Zucker oder Fett enthalten. Da viele Kunden Präferenzen für die damit verbundenen Geschmackseigenschaften der Produkte haben, besteht für einzelne Firmen kein Anreiz, den Zucker- oder Fettgehalt der Produkte zu senken, solange andere Firmen dies nicht ebenfalls tun, denn sie müssen damit rechnen, Kunden zu verlieren. So ist es wenig verwunderlich, dass freiwillige Initiativen der

40 VON MEYER-HÖFER und SPILLER 2016, S. 80.

41 ZÜHLSDORF et al. 2018, S. 8.

42 DBV 2018, S. 42.

43 DBV 2018, S. 43.

44 DBV 2018, S. 39.

45 *TransFair* 2017, S. 6.

Ernährungsindustrie zur Begrenzung gesundheitlich problematischer Inhaltsstoffe bislang wenig erfolgreich waren, wie die internationale Erfahrung zeigt.⁴⁶ In Deutschland läuft derzeit eine Initiative des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), die Ernährungsindustrie zu einer freiwilligen Selbstverpflichtung zu bewegen.⁴⁷

4.4 Steuerungsmöglichkeiten des Staates

Wie im Abschnitt 4.2 aufgezeigt wurde, liegen den Problemen des Agrar- und Ernährungssektors, die in Abschnitt 3 skizziert wurden, Steuerungsprobleme des Marktes, oder anders ausgedrückt, verschiedene Formen von Marktversagen zu Grunde, und zwar sowohl auf Seiten der Produzenten als auch der Konsumenten. Daher ist es zur Lösung der Probleme notwendig, dass der Staat steuernd eingreift. Dazu steht dem Staat ein weites Spektrum an politischen Steuerungsinstrumenten (d. h. Politikmaßnahmen) zur Verfügung, die sowohl bei den Produzenten (d. h. bei den Landwirten und den vor- und nachgelagerten Unternehmen) ansetzen können (siehe Abb. 1, Pfeil von Box H zur Produktionsseite des Agrar- und Ernährungssystems) als auch bei den Verbraucherinnen und Verbrauchern (Pfeil von Box H zu Box F).

Die Politikinstrumente können nach ihrer Eingriffstiefe in das Agrar- und Ernährungssystem klassifiziert werden. Instrumente mit weitreichender Eingriffstiefe sind Regulierungen, wie Verbote, und ökonomische Steuerungsinstrumente, wie etwa Steuern. Ein Beispiel für Steuern, die an der Produktionsseite ansetzen, ist eine Stickstoffsteuer zur Verringerung der Nitratbelastung. Beispiele für Steuern auf Verbraucherseite sind Steuern auf tierische Produkte, Zucker oder Fett. Eine geringere Eingriffstiefe haben Maßnahmen, die auf freiwilliges Handeln setzen. Auf der Produktionsseite gehören dazu z. B. die Subventionierung besonders umweltfreundlicher Produktionsverfahren sowie Maßnahmen, die Innovationen fördern, z. B. staatlich finanzierte Agrarforschung und Agrarberatung (Box M in Abb. 1). Auf der Konsumentenseite gehören dazu z. B. staatliche Informationsprogramme zu nachhaltiger Ernährung oder das schon erwähnte *Nudging*.

Die Tatsache, dass wie in Abschnitt 3 aufgeführt, gravierende Probleme im Agrar- und Ernährungssystem bestehen, weist darauf hin, dass diese Politikinstrumente nicht effektiv genutzt werden. Die Ursachen dafür liegen in Steuerungsproblemen des politisch-administrativen Systems, die nachfolgend anhand von Beispielen erläutert werden.

4.5 Steuerungsprobleme bei Politikmaßnahmen, die bei der Agrarproduktion ansetzen

Ein anschaulicher Fall für Steuerungsprobleme auf der Produktionsseite ist die Stickstoffproblematik, die in Abschnitt 3.1 behandelt wurde und die auch in der deutschen Landwirtschaft ein gravierendes Problem darstellt. Auf Grund von Überdüngung wird seit Jahren

46 SWINBURN et al. 2015, S. 2538.

47 Dazu wurde im September 2018 eine Grundsatzklärung zwischen dem BMEL und einer Reihe von Wirtschaftsverbänden unterzeichnet. Siehe: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ernaehrung/GrundsatzvereinbarungReduktion.pdf?__blob=publicationFile.

in mehr als 15 % der Messstellen in Deutschland der Grenzwert der EU-Nitratrichtlinie für Nitrat im Grundwasser überschritten. Das führte dazu, dass der Europäische Gerichtshof Deutschland am 21. 6. 2018 wegen Verletzung der EU-Nitratrichtlinie verurteilt hat.⁴⁸ Wie konnte es zu diesem „Politikversagen“ kommen? Das Politikinstrument, mit dem dieses Problem gelöst werden soll, ist eine Regulierung, nämlich das Düngegesetz und die darauf beruhende Düngeverordnung.⁴⁹ Die Verordnung regelt die „gute fachliche Praxis“, die angewandt werden soll, um Nährstoffüberschüsse zu vermeiden. Sie legt zum Beispiel fest, wie der Düngebedarf an Stickstoff und Phosphor zu berechnen ist, in welchen Zeiträumen Wirtschaftsdünger ausgebracht werden darf und welche Anforderungen an die Ausbringungsgeräte bestehen. Diese Regelungen waren offensichtlich nicht weitreichend genug, um die Nährstoffüberschüsse der deutschen Landwirtschaft wirksam zu begrenzen. Der durchschnittliche Stickstoffüberschuss der deutschen Landwirtschaft sank zwar im Zeitraum von 1990 und 2010, aber er betrug 2010 im Durchschnitt immer noch fast 100 kg Stickstoff je Hektar, während die Stickstoffnutzungseffizienz unter 60 % lag.⁵⁰ Im Jahr 2012 stellte eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe, die zur Evaluierung der Düngeverordnung eingesetzt wurde, Änderungsbedarf fest. Hinzu kam, dass auch die EU Änderungsbedarf anmahnte. Zur Unterstützung dieses Reformprozesses legten verschiedene wissenschaftliche Beiräte der Bundesregierung eine Kurzstellungnahme zur Novellierung der Düngeverordnung vor (*WBA et al.* 2013). In dem hier verwendeten Analyserahmen fällt diese Maßnahme unter Politikberatung (Link von Box M nach Box H). Im Jahr 2017 wurde die Düngeverordnung schließlich novelliert, jedoch blieb die Novelle hinter den Empfehlungen aus der Wissenschaft zurück. Der Verordnung waren Proteste von Landwirten, einschließlich Demonstrationen, vorausgegangen. Der Präsident eines regionalen Bauernverbandes wurde in der Agrarpresse mit der Einschätzung zitiert, dass der Protest „sehr geholfen“ habe, eine weitreichendere Verschärfung der Düngeverordnung zu verhindern (*DETER* 2019).

Derartige Lobbyaktivitäten (Link I–H in Abb. 1) sind im politischen Steuerungssystem einer repräsentativen Demokratie durchaus normal. Allerdings hätte man erwarten können, dass aus der Zivilgesellschaft, speziell von Seiten der Umwelt- und Verbraucherverbände (Link J–H), eine Gegensteuerung erfolgen würde, etwa durch öffentliche Proteste oder Kampagnen für eine strengere Gesetzgebung zum Schutz von Umwelt und Verbrauchern. Eine effektive Gegensteuerung fand jedoch nicht statt, zumal auch in den Medien (Box L) das Thema nicht in prominenter Weise thematisiert wurde. Dies lässt sich möglicherweise damit erklären, dass das öffentliche „Entrüstungspotenzial“⁵¹ bei der Nitratbelastung im Trinkwasser geringer ist als bei anderen landwirtschaftlichen Themen. Zivilgesellschaftliche Verbände haben höhere Anreize, sich für solche Themen zu engagieren, die auch in den Medien aufgegriffen werden, wie die Beispiele Tierwohl, Bienensterben, Glyphosat und Grüne Gentechnik zeigen.

48 Siehe <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-nitrat-im-grundwasser#textpart-1>.

49 Der genaue Titel lautet: „Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV)“. Siehe: http://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/index.html.

50 *WBA et al.* 2013, S. 7.

51 Zur Rolle von Nicht-Regierungsorganisationen (NGOs), öffentliche Entrüstung („outray“) für Kampagnen zu nutzen, siehe *BERNAUER und MEINS* 2003.

Das Ergebnis im Fall der Düngeverordnung kann als typisch für diese Art der Steuerungsprobleme im politisch-administrativen System betrachtet werden. 2017 wurde zwar eine Novellierung der Düngeverordnung durchgeführt, womit die Regierung öffentlich ihren Willen demonstrieren konnte, das Problem anzugehen. Die Regelung ging aber nicht weit genug, um das Umweltproblem auch effektiv zu lösen. Vermutlich hätte sich an dieser Situation wenig geändert, wenn die Nitratbelastung nicht auch in einer EU-Richtlinie geregelt wäre, die von einer Einrichtung (nämlich dem Europäischen Gerichtshof) umgesetzt wird, die nicht direkt dem Lobbyeinfluss der Bauernverbände der Mitgliedsstaaten unterliegt. Nach der Verurteilung Deutschlands durch den Europäischen Gerichtshof wurde von der Bundesregierung eine weitere Novelle der Düngeverordnung auf den Weg gebracht. Auch daraufhin gab es im April 2019 wieder Proteste von Bauern (*WDR* 2019). Zum Zeitpunkt der Abgabe dieses Beitrags lag noch kein Beschluss zur Düngeverordnung vor, aber es erscheint möglich, dass auf Grund der Androhung von hohen Strafzahlungen seitens der EU nun tatsächlich eine Verschärfung der Düngeverordnung erfolgen wird.⁵²

Die Düngemittelverordnung ist nur ein Beispiel dafür, dass auf Grund des erheblichen Einflusses der landwirtschaftlichen Interessenvertretung (Box I in Abb. 1) Umweltprobleme ungelöst bleiben, vor allem in Bereichen, in denen die Umwelt- und Verbraucherverbände (Box J) auf Grund eines geringen „Entrüstungspotenzials“ wenig Anreize haben, sich stark zu engagieren. Ein weiteres Beispiel dieses Problems ist die Forderung, die EU-Agrarsubventionen, die immerhin über 40 % der landwirtschaftlichen Einkommen ausmachen,⁵³ für Gemeinwohlleistungen, wie etwa den Umwelt- und Klimaschutz, in der Landwirtschaft zu nutzen, anstatt sie – wie bisher – überwiegend flächenbezogen als allgemeine Einkommensbeihilfe zu zahlen (*WBAE* 2018). Forderungen dieser Art werden schon seit Jahren von wissenschaftlicher Seite erhoben, ohne dass es einen nennenswerten Fortschritt in der Reform der EU-Agrarpolitik gab, und auch für die 2020 anstehende Reform sind die Aussichten einer Umsteuerung gering. Zivilgesellschaftliche Verbände engagieren sich kaum in dieser Frage, obwohl es auch aus sozialen Gründen höchst problematisch ist, dass mit dem Argument der Einkommensstützung in erheblichem Ausmaß Steuermittel an Unternehmer transferiert werden, z. B. Eigentümer großer landwirtschaftlicher Betriebe, die gar nicht auf Subventionen angewiesen wären (*WBAE* 2018). Diese Mittel fehlen dann für die Lösung der Umwelt-, Klima- und Tierschutzprobleme der Landwirtschaft.

Es stellt sich allerdings die Frage, warum in dieser Hinsicht die Steuerung über die Parteien (Box K in Abb. 1) nicht besser funktioniert. Man könnte ja erwarten, dass sich Parteien, die traditionell ohnehin wenig politische Unterstützung von den Landwirten bekommen, auch gegen den Widerstand landwirtschaftlicher Interessenverbände dafür einsetzen, die Umweltprobleme der Landwirtschaft zu lösen, insbesondere wenn die entsprechenden Parteien in der Regierungsverantwortung stehen. Dies trifft für die SPD zu, die 2017 von 5 % der Landwirte gewählt wurde, während 61 % der Landwirte für die CDU und 14 % für die FDP stimmten (*KRAUSS* 2019). Dennoch ist ein Engagement der Partei in der Agrar-Umweltpolitik nicht zu beobachten. Der berufliche Hintergrund der Mitglieder des

52 Die Bundeslandwirtschaftsministerin verteidigte die Novellierung der Düngeverordnung, als sie auf der Demonstration der Landwirte in Münster im April 2019 eine Ansprache hielt (*WDR* 2019). Außerdem ist ein verstärktes Engagement der Umweltverbände zu beobachten, die nun die Verurteilung durch den Europäischen Gerichtshof zum Anlass für Pressearbeit nutzen können (siehe z. B. <https://www.nabu.de/news/2018/06/24688.html>).

53 *BMEL* 2015, S. 60.

Bundestagsausschusses für Landwirtschaft und Ernährung weist darauf hin, dass die SPD im Gegensatz zu den anderen Parteien offensichtlich wenig Anreize oder Möglichkeiten hatte, Mitglieder mit landwirtschaftlicher Expertise in den Ausschuss zu entsenden (siehe Tab. 1). Von den 2018 im Ausschuss vertretenen Mitgliedern der SPD hatte keine/keiner eine landwirtschaftliche oder agrarwissenschaftliche Ausbildung oder eine berufliche Tätigkeit in diesem Bereich aufzuweisen, während dies für alle Mitglieder der CDU/CSU-Fraktion zutraf, die in ihrer Laufbahn zudem oft auch Funktionen im Bauernverband wahrgenommen hatten.⁵⁴ Dies weist auf eine sehr effektive Vertretung landwirtschaftlicher Interessengruppen im Bundestag hin. Was bei der Betrachtung des beruflichen Hintergrundes der Ausschussmitglieder auch auffällt, ist die Tatsache, dass 2018 keines der Ausschussmitglieder einen beruflichen Bezug zum Thema Ernährung aufwies, obwohl dieser Ausschuss auch für die Ernährungspolitik zuständig ist.

Tab. 1 Beruflicher Hintergrund der Mitglieder im Bundestagsausschuss für Ernährung und Landwirtschaft

Fraktion	Zahl der Mitglieder mit beruflicher Ausbildung oder Tätigkeit im Bereich der Agrar-/Landwirtschaft bezogen auf die Gesamtzahl der Mitglieder der entsprechenden Fraktion
CDU/CSU	13/13
SPD	0 / 8
Grüne	4 / 4
Linke	2 / 4
FDP	1 / 4
AfD	1 / 4

Quelle: Zusammengestellt auf der Basis der biografischen Information über die Ausschuss-Mitglieder auf der offiziellen Webseite des Bundestagsausschusses für Ernährung und Landwirtschaft (https://www.bundestag.de/ausschuesse/a10_Ernaehrung_Landwirtschaft, 20. 9. 2018)

4.6 Steuerungsprobleme bei Politikmaßnahmen, die beim Verbrauch ansetzen

Steuerungsprobleme treten auch bei Politikmaßnahmen auf, die beim Verbrauch ansetzen. So hat zum Beispiel der Wissenschaftliche Beirat für Agrar- und Ernährungspolitik in einem Gutachten zum Klimaschutz gefordert, die Mehrwertsteuervergünstigung für Lebensmittel tierischer Herkunft abzuschaffen. Entsprechend sollte auf diese Produkte der Regelsteuersatz von 19% statt des ermäßigten Satzes von 7% angewendet werden. Gleichzeitig wurde empfohlen, diese Maßnahme sozialpolitisch zu flankieren.⁵⁵ Mit der damit verbundenen Erhöhung der Preise für Lebensmittel tierischer Herkunft soll ein reduzierter Konsum tierischer Produkte erreicht werden. Dies hätte einerseits positive Auswirkungen auf Klima und Umwelt: weniger Treibhausgasemissionen, weniger Flächenansprüche und weniger Nitrat im Grundwasser. Andererseits hätte die Maßnahme auch positive Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, denn die Deutsche Gesellschaft für Ernährung emp-

⁵⁴ Dies geht aus der offiziellen Webseite des Bundestagsausschusses für Ernährung und Landwirtschaft hervor (https://www.bundestag.de/ausschuesse/a10_Ernaehrung_Landwirtschaft, 20. 9. 2018).

⁵⁵ *WBAE* und *WBW* 2016, S. 347.

fehlt einen Fleischkonsum, der deutlich niedriger liegt als der derzeitige Konsum.⁵⁶ Auch das Umweltbundesamt (UBA) hat festgestellt, dass es „konsequent wäre“, den reduzierten Mehrwertsteuersatz für tierische Produkte abzuschaffen und dies sozialpolitisch zu flankieren.⁵⁷ Diese Politikmaßnahme ist allerdings weder aus der Sicht der Verbraucher noch aus der Sicht der Landwirtschaft populär. Daher ist es auch nicht verwunderlich, dass sich Vertreter aller Regierungsparteien, CDU/CSU und SPD (einschließlich der damals amtierenden Umweltbundesministerin der SPD HENDRICKS), umgehend öffentlich gegen diese Maßnahme aussprachen. Auch Vertreter der Grünen lehnten den Vorschlag ab (DREBES 2017). Von daher ist es wenig wahrscheinlich, dass dieser Vorschlag in absehbarer Zeit umgesetzt werden wird.

Auch die internationale Erfahrung unterstreicht die Herausforderungen, Verbrauchssteuern politisch durchzusetzen. In Dänemark wurde beispielsweise 2011 eine Steuer auf gesättigte Fettsäuren eingeführt, die dann aber bereits 2012 wieder abgeschafft wurde. Eine Analyse des Falls zeigte, dass die Steuer vor allem aus fiskalpolitischen Gründen eingeführt worden war, obwohl sie ursprünglich von Gesundheitsexperten empfohlen worden war. Da die Steuer sehr unpopulär war und wenig Unterstützer im politischen Raum hatte, wurde sie beim nächsten Regierungswechsel wieder abgeschafft. Forschungsergebnisse, die kurz nach der Abschaffung veröffentlicht wurden, zeigten, dass die Maßnahme durchaus effektiv war und zu einer (wenngleich mäßigen) Reduktion des Fleischkonsums geführt hatte (VALLGÅRDA et al. 2015).

Wie politisch sensitiv Politikinstrumente sind, die das Verbraucherverhalten beeinflussen wollen, zeigt auch die Erfahrung der Grünen mit dem „Veggie-Day“. Im Wahlprogramm für die Bundestagswahl 2013 hatte die Partei im Abschnitt „Massentierhaltung“ folgendes Ziel formuliert: „Angebote von vegetarischen und veganen Gerichten und ein ‚Veggie Day‘ sollen zum Standard werden.“⁵⁸ Im Wahlkampf griff die *BILD-Zeitung* dieses eher moderat formulierte Ziel auf und titelte mit der Schlagzeile „Die Grünen wollen uns das Fleisch verbieten“. Dies führte zu einem „medialen Aufschrei“,⁵⁹ der als einer der Gründe für die Stimmenverluste der Partei 2013 angesehen wird. Der Fall zeigt, wie hoch das „Entrüstungspotenzial“ im Bereich Ernährung ist, was mit dazu beiträgt, dass Steuerungsinstrumente, die beim Verbraucher ansetzen, im politischen Prozess nur schwer umsetzbar sind.

5. Schlussfolgerungen

Wie am Beginn dieses Beitrags aufgezeigt, steht das Agrar- und Ernährungssystem vor großen Herausforderungen. Im zweiten globalen Nachhaltigkeitsziel hat sich die Weltgemeinschaft darauf verpflichtet, bis zum Jahr 2030 alle Formen von Fehlernährung zu überwinden: den Hunger (Kalorienmangel), den versteckten Hunger (Mikronährstoffmangel) und das Problem von Übergewicht und Adipositas. Gleichzeitig muss es der Landwirtschaft gelingen, nicht nur die Agrarproduktion erheblich zu steigern, um die steigende Weltbe-

56 *WBAE* und *WBW* 2016, S. 206.

57 *UBA* 2017, S. 17.

58 Grünes Wahlprogramm 2013, S. 165; zitiert nach *PROBST* 2015, S. 141.

59 *PROBST* 2015, S. 149.

völkerung zu ernähren, sondern ebenso die gravierenden Umweltprobleme zu lösen, die mit derzeitigen Produktionssystemen verbunden sind. Schließlich trägt die Landwirtschaft wesentlich dazu bei, dass bei vier der neun planetaren Grenzen bereits die Stufe des steigenden oder hohen Risikos erreicht ist. Sowohl für die Umweltprobleme der Landwirtschaft als auch für die Ernährungsprobleme gibt es Lösungswege. Für die Forschung gibt es neue Chancen, zur Problemlösung beizutragen, z. B. in der Nutzung neuer Züchtungsverfahren wie der Genom-Editierung, im biologischen Pflanzenschutz und in der Digitalisierung der Landwirtschaft. Um die Ernährungs- und Umweltprobleme zu lösen, ist jedoch auch eine Änderung der politischen Rahmenbedingungen erforderlich. Wie in dem Beitrag aufgezeigt wird, liegen den beobachteten Umweltproblemen der Landwirtschaft verschiedene Formen des Marktversagens zu Grunde, die den Einsatz von Politikmaßnahmen erforderlich machen. Exemplarisch wurde am Beispiel der deutschen Agrar- und Ernährungspolitik aufgezeigt, dass die gegenwärtig praktizierten Politikprozesse weder im Ernährungsbereich noch in der Landwirtschaft dazu führen, dass Politikmaßnahmen umgesetzt werden, die zur Erreichung der Umwelt- und der Ernährungsziele sinnvoll wären. Auch wenn sich die politischen Prozesse und Akteure zwischen den Ländern unterscheiden, so zeigt das Beispiel Deutschlands doch grundlegende Steuerungsprobleme der repräsentativen Demokratie auf, die sicherlich auch in anderen Ländern und auf EU-Ebene dazu führen, dass Ernährungs- und Umweltziele der Landwirtschaft nicht erreicht werden.

Dieser Befund wirft die Frage auf, wie die *Governance*-Probleme gelöst werden können, die mit Hilfe des hier vorgestellten Analyserahmens identifiziert wurden. Eine Option besteht darin, die politischen Prozesse der repräsentativen Demokratie durch Elemente einer deliberativen Demokratie zu erweitern. Damit könnten in verschiedenen Formen der Beteiligung Landwirtinnen und Landwirte, Bürgerinnen und Bürger sowie zivilgesellschaftliche Akteure frühzeitig im politischen Prozess zusammengebracht werden, um über den Austausch von Argumenten mit dem Ziel einer gemeinsamen Willensbildung neue Lösungswege zu finden.⁶⁰ Darüber hinaus wäre eine verstärkte Forschung zu den politischen Prozessen in der Agrar- und Ernährungspolitik aus politikwissenschaftlicher Perspektive sinnvoll, um Ansatzpunkte für neue Lösungswege zu finden. Diese Forschung sollte sich auch mit der Frage befassen, wie gesellschaftliche Kontroversen um neue Technologien überwunden werden können, die ein hohes Problemlösungspotenzial haben, wie etwa die Verfahren der Genom-Editierung.

Auch wäre es in Anbetracht der Steuerungsprobleme im politischen System vorteilhaft, wenn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die die Herausforderungen des Agrar- und Ernährungssystems aus ihrer eigenen Forschung kennen, mehr direkt mit der Öffentlichkeit kommunizieren. Die hier geschilderten Fälle haben schließlich gezeigt, dass traditionelle Wege der Politikberatung, z. B. über wissenschaftliche Beiräte, ihre Grenzen haben. Möglichkeiten der direkten Kommunikation zwischen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern und Öffentlichkeit bestehen beispielsweise im Verfassen von Beiträgen in Tageszeitungen in Form von Hintergrundberichten und Stellungnahmen zu aktuellen Themen, im Verfassen populärwissenschaftlicher Bücher, in der Teilnahme an Diskussionsveranstaltungen und in der Nutzung sozialer Medien. Um diese Optionen verstärkt zu nutzen, müssten allerdings im wissenschaftlichen System bessere Anreize für solche Interaktionen von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern mit der Öffentlichkeit geschaffen werden.

60 Vgl. z. B. NANZ und FRITSCHKE 2012, *WBA* 2015.

Dies ist keine triviale Aufgabe. In Anbetracht der großen Herausforderung einer nachhaltigen Sicherung der Welternährung scheint es aber gerechtfertigt und notwendig, in jeder Hinsicht die bestmöglichen Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass die Wissenschaft zur Lösung der drängenden Probleme beitragen kann.

Literatur

- AEREOBE, F.: Allgemeine Landwirtschaftliche Betriebslehre: Die Bewirtschaftung von Landgütern und Grundstücken. Berlin: Paul Parey 1917
- AKERLOF, G. A.: The market for "Lemons": Quality uncertainty and the market mechanism. *The Quarterly Journal of Economics* 84/3, 488 (1970)
- ALEXANDRATOS, N., and BRUINSMA, J.: World Agriculture Towards 2030/2050 – The 2012 Revision. ESA Working Paper No. 12–03, Agricultural Development Economics Division (ESA). Rome: Food and Agriculture Organization (FAO) 2012
- ALLEN, R. C.: Tracking the agricultural revolution in England. *The Economic History Review* 52/2, 209–235 (1999)
- BARRANGOU, R., and DOUDNA, J. A.: Applications of CRISPR technologies in research and beyond. *Nature Biotechnology* 34/9, 17–20 (2016)
- BENZ, A., LÜTZ, S., SCHIMANK, U., und SIMONIS, G.: Einleitung. In: BENZ, A., LÜTZ, S., SCHIMANK, U., und SIMONIS, G. (Eds.): *Handbuch Governance – Theoretische Grundlagen und empirische Handlungsfelder*. S. 1–25. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2007
- BERNAUER, T., and MEINS, E.: Technological revolution meets policy and the market: Explaining cross-national differences in agricultural biotechnology regulation. *European Journal of Political Research* 42, 643–683 (2003)
- Bioökonomierat*: Genome Editing: Europa benötigt ein neues Gentechnikrecht. BÖRMEMO 07, Berlin (2019)
- BIRNER, R., BRÄUER, I., GRETHE, H., HIRSCHFELD, J., LÜTH, M., MEYER, J., WÄLZHOLZ, A., WENK, R., und WITTMER, H.: Ich kaufe, also will ich. *Berichte über Landwirtschaft* 80/4, 590–613 (2002)
- BIRNER, R., NASEEM, A., PRAY, C., and ANDERSON, J. R.: Fostering the political will to drive agricultural transformation. In: *AGRA* (Ed.): *Africa Agriculture Status Report 2018 – Catalyzing Government Capacity to Drive Agricultural Transformation*; pp. 22–50. Nairobi: Alliance for a Green Revolution in Africa (AGRA) 2018
- BIRNER, R., and PRAY, C.: Bioeconomy. In: SERRAJ, R., and PINGALI, P. (Eds.): *Agriculture and Food Systems to 2050*; pp. 503–544. Singapore: World Scientific Publishing 2018
- BMEL*: Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2015. Berlin: Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2015
- BOSERUP, E.: *The Conditions of Agricultural Growth: The Economics of Agrarian Change under Population Pressure*. London: Allen and Unwin 1965
- CAMPBELL, B. M., BEARE, D. J., BENNETT, E. M., HALL-SPENCER, J. M., INGRAM, J. S. I., and JARAMILLO, F.: Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22/4, 8 (2017)
- CROSSA, J., PÉREZ-RODRÍGUEZ, P., CUEVAS, J., MONTESINOS-LÓPEZ, O., JARQUÍN, D., LOS CAMPOS, G. DE, BURGUEÑO, J., GONZÁLEZ-CAMACHO, J. M., PÉREZ-ELIZALDE, S., BEYENE, Y., DREISIGACKER, S., SINGH, R., ZHANG, X., GOWDA, M., ROORKIWAL, M., RUTKOSKI, J., and VARSHNEY, R. K.: Genomic selection in plant breeding: Methods, models and perspectives. *Trends in Plant Science* 22/11, 961–975 (2017)
- DAUM, T.: ICT applications in agriculture. In: FERRANTI, P., BERRY, E. M., and ANDERSON, J. R. (Eds.): *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*. Vol. 1, pp. 255–260. Amsterdam: Elsevier 2019
- DBV*: Situationsbericht 2018/19: Trends und Fakten zur Landwirtschaft. Berlin: Deutscher Bauernverband 2018
- DETER, A.: NRW: Protest gegen Düngeverordnung zeigt Wirkung. *TopAgrar* vom 27. 3. 2017. <https://www.topagrar.com/acker/news/nrw-protest-der-bauern-gegen-duengeverordnung-zeigt-wirkung-9856334.html>
- Development Initiatives*: 2018 Global Nutrition Report: Shining a Light to Spur Action on Nutrition. Bristol: Development Initiatives 2018
- DREBES, J.: Bundesregierung lehnt höhere Mehrwertsteuer auf Fleisch ab. *Rheinische Post* (RP) Online vom 6. 1. 2017. https://rp-online.de/politik/deutschland/bundesregierung-lehnt-hoehere-mehrwertsteuer-auf-fleisch-ab_aid-1908299 (2017)

- DUDLEY, N., and ALEXANDER, S.: Agriculture and biodiversity: a review. *Biodiversity* 18/2,3, 45–49. <https://doi.org/10.1080/14888386.2017.1351892> (2017)
- EASAC: Opportunities and Challenges for Research on Food and Nutrition Security and Agriculture in Europe. Halle (Saale): European Academies Science Advisory Council (EASAC) 2017
- ELLSÄSSER, G., BÖHM, A., KUHN, J., LÜDECKE, K., and ROJAS, G.: Soziale Ungleichheit und Gesundheit bei Kindern – Ergebnisse und Konsequenzen aus den Brandenburger Einschulungsuntersuchungen. *Kinderärztliche Praxis* 73, 248–257 (2002)
- European Commission: Agri-food trade statistical factsheet: European Union – Extra EU 28. https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/trade-analysis/statistics/outside-eu/regions/agrifood-extra-eu-28_en.pdf 2018a
- European Commission: Agri-food trade statistical factsheet: European Union – Sub-Saharan Africa. https://ec.europa.eu/agriculture/sites/agriculture/files/trade-analysis/statistics/outside-eu/regions/agrifood-sub-saharan-countries_en.pdf 2018b
- FAO: Status of the World's Soil Resources – Main Report. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO) 2015a
- FAO: The second report on the state of the world's animal genetic resources for food and agriculture. Rome: FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture, Food and Agriculture Organization (FAO) 2015b
- FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO: The State of Food Security and Nutrition in the World 2018 – Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition. Rome: Food and Agriculture Organization (FAO), International Fund for Agricultural Development (IFAD), UNICEF, World Food Program (WFP) and World Health Organization (WHO) 2018
- FLAHERTY, S., MCCARTHY, M., COLLINS, A., and McAULIFFE, F.: Can existing mobile apps support healthier food purchasing behaviour? Content analysis of nutrition content, behaviour change theory and user quality integration. *Public Health Nutrition* 21/2, 288–298 (2017)
- Foodwatch: Die Hungermacher – Wie Deutsche Bank, Goldman Sachs and Co. auf die Kosten der Ärmsten mit Lebensmitteln spekulieren. Berlin: Foodwatch e.V. 2011
- FRANK, J., and BIESALSKI, H.-K.: Kinder in Ernährungsarmut. Stuttgart: Society of Nutrition and Food Science 2018
- FUGLIE, K.: Accounting for growth in global agriculture. *Bio-Based and Applied Economics* 4/3, 201–234 (2015)
- GARNETT, T., APPLEBY, M. C., BALMFORD, A., BATEMAN, I. J., BENTON, T. G., BLOOMER, P., BURLINGAME, B., DAWKINS, M., DOLAN, L., FRASER, D., HERRERO, M., HOFFMANN, L., SMITH, P., THORNTON, P. K., TOULMIN, C., VERMEULEN, S. J., and GODFRAY, H. C. J.: Sustainable intensification in agriculture: Premises and policies. *Science* 341, 33–35 (2013)
- GIZ: Agrarhandelspolitik für ländliche Entwicklung und Ernährungssicherung. Bonn: Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) 2013
- GIZ: Hähnchenproduktion in Kamerun: Wirkungen der Importbeschränkung der kamerunischen Geflügelbranche. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) 2018a
- GIZ: Milchwirtschaft in Burkina Faso – Potenzial und Auswirkungen europäischer Milchpulverexporte. Eschborn: Gesellschaft für internationale Zusammenarbeit (GIZ) 2018b
- GÖDECKE, T., STEIN, A. J., and QAIM, M.: The global burden of chronic and hidden hunger: Trends and determinants. *Global Food Security* 17, 21–29 (2018)
- GONZALEZ-DE-SANTOS, P., RIBEIRO, A., FERNANDEZ-QUINTANILLA, C., LOPEZ-GRANADOS, F., BRANDSTOETTER, M., TOMIC, S., PEDRAZZI, S., PERUZZI, A., PAJARES, G., KAPLANIS, G., PEREZ-RUIZ, M., VALERO, C., DEL CERRO, J., VIERI, M., RABATEL, G., and DEBILDE, B.: Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agriculture* 18/4, 574–614 (2017)
- HAGGBLADE, S., MINTEN, B., PRAY, C., REARDON, T., and ZILBERMAN, D.: The herbicide revolution in developing countries: Patterns, causes, and implications. *European Journal of Development Research* 29, 533–559 (2017)
- HAYAMI, Y., and RUTTAN, V.: Induced Innovation in Agricultural Development. Minnesota Discussion Paper No. 3, 1971, Center for Economics Research, University of Minnesota 1971
- HAYES, B. J., LEWIN, H. A., and GODDARD, M. E.: The future of livestock breeding: Genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. *Trends in Genetics* 29/4, 206–214 (2013)
- HLPE: Food Losses and Waste in the Context of Sustainable Food Systems – A Report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition (HLPE). Rome: Committee on World Food Security 2014
- HLPE: Nutrition and Food Systems – A Report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition (HLPE). Rome: Committee on World Food Security 2017

- HOLZMANN, S. L., PRÖLL, K., HAUNER, H., and HOLZAPFEL, C.: Nutrition apps: Quality and limitations. An explorative investigation on the basis of selected apps. *Ernährungsumschau* 64/5, 80–89 (2017)
- IAASTD: Agriculture at a crossroads: International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development (IAASTD) – Synthesis Report. Washington, DC (USA): Island Press 2009
- IAP: Opportunities for future research and innovation on food and nutrition security and agriculture: The Inter-Academy Partnership’s global perspective. Trieste and Washington, DC: InterAcademy Partnership (IAP) 2018
- JOHN, A. J., CLARK, C. E. F., FREEMAN, M. J., KERRISK, K. L., GARCIA, S. C., and HALACHMI, I.: Review: Milk-ing robot utilization, a successful precision livestock farming evolution. *Animal* 10/9, 1484–1492 (2016)
- KRAUSS, H.: Bundestagswahl 2017: So wählten Landwirte. *Agrarheute* vom 25. 9. 2017.
<https://www.agrarheute.com/politik/bundestagswahl-2017-so-waechlten-landwirte-538763> (2019)
- LUNDVALL, B. Å.: National innovation systems – Analytical concept and development tool. *Industry and Innovation* 14/1, 95–119 (2007)
- MEYER-HÖFER, M. VON, und SPILLER, A.: Strategien und Erfolgskriterien für Zertifizierungssysteme am Beispiel der Agrar- und Ernährungswirtschaft. In: FRIEDEL, R., und SPINDLER, E. A. (Eds.): *Zertifizierung als Erfolgsfaktor: Nachhaltiges Wirtschaften mit Vertrauen und Transparenz*. S. 75–88. Wiesbaden: Springer Gabler 2016
- NANZ, P., und FRITSCH, M.: *Handbuch Bürgerbeteiligung – Verfahren und Akteure, Chancen und Grenzen*. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung 2012
- OLSON, M.: *The Logic of Collective Action*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press 1965
- OSTROM, E.: *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. New York: Cambridge University Press 1990
- PAUSTIAN, M., and THEUVSEN, L.: Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. *Precision Agriculture* 18/5, 701–716 (2017)
- PFEIFFER, S.: *Die verdrängte Realität: Ernährungsarmut in Deutschland – Hunger in der Überfluggesellschaft*. Wiesbaden: Springer 2014
- PROBST, L.: Bündnis 90/Die Grünen: Absturz nach dem Höhenflug. In: NIEDERMAYER, O. (Ed.): *Die Parteien nach der Bundestagswahl 2013*. S. 135–158. Wiesbaden: Springer 2015
- REICHERT, T.: Keine Probleme mehr? Über die Auswirkungen der EU-Agrarpolitik auf die Entwicklungsländer nach dem Ende der EU-Exportsubventionen. In: *Agrarbündnis* (Ed.): *Der kritische Agrarbericht*. S. 111–114. Konstanz: Agrarbündnis e. V. 2019
- REISCH, L. A., SUNSTEIN, C. R., and GWOZDZ, W.: Viewpoint: Beyond carrots and sticks: Europeans support health nudges. *Food Policy* 69, 1–10 (2017)
- ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN, F. S., LAMBIN, E. F., LENTON, T. M., SCHEFFER, M., FOLKE, C., SCHELLNHUBER, H. J., NYKVIST, B., WIT, C. D. DE, HUGHES, T., VAN DER LEEUW, S., RODHE, H., SÖRLIN, S., SNYDER, P. K., COSTANZA, R., SVEDIN, U., FALKENMARK, M., KARLBERG, L., CORELL, R. W., FABRY, V. J., HANSEN, J., WALKER, B., LIVERMAN, D., RICHARDSON, K., CRUTZEN, P., and FOLEY, J.: A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009)
- SANKOH, A. I., WHITTLE, R., SEMPLE, K. T., JONES, K. C., and SWEETMAN, A. J.: An assessment of the impacts of pesticide use on the environment and health of rice farmers in Sierra Leone. *Environment International* 94, 458–466 (2016)
- SCHIMMELPFENNIG, D., and EBEL, R.: Sequential adoption and cost savings from precision agriculture. *Journal of Agricultural and Resource Economics* 41/1, 97–115 (2016)
- SERRAJ, R., and PINGALI, P. (Eds.): *Agriculture and Food Systems to 2050*. Singapore: World Scientific Publishing 2019
- SPIELMAN, D., and BIRNER, R.: *How Innovative Is Your Agriculture? Using Innovation Indicators and Benchmarks to Strengthen National Agricultural Innovation Systems*. Agriculture and Rural Development Discussion Paper 41. Washington DC: World Bank 2018
- SWINBURN, B., KRAAK, V., RUTTER, H., VANDEVIJVERE, S., LOBSTEIN, T., SACKS, G., GOMES, F., MARSH, T., and MAGNUSSON, R.: Strengthening of accountability systems to create healthy food environments and reduce global obesity. *The Lancet* 385/9986, 2534–2545 (2015)
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)61747-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)61747-5)
- SWINNEN, J.: The right price of food. *Development Policy Review* 29/6, 667–688 (2011)
- TransFair*: *Transfair e. V. Jahres- und Wirkungsbericht 2017*. Münster: TransFair e. V. 2017

- TULLY, K., SULLIVAN, C., WEIL, R., and SANCHEZ, P.: The state of soil degradation in Sub-Saharan Africa: Baselines, trajectories, and solutions. *Sustainability* 7/6, 6523–6552 (2015)
- UBA: Umweltschutz in der Landwirtschaft. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2017
- VALLGÅRDA, S., HOLM, L., and JENSEN, J. D.: The Danish tax on saturated fat: Why it did not survive. *European Journal of Clinical Nutrition* 69, 223–226 (2015)
- VAN DEN BROECK, G., and MAERTENS, M.: Horticultural exports and food security in developing countries. *Global Food Security* 10, 11–20 (2016)
- VAN LENTEREN, J. C., BOLCKMANS, K., KÖHL, J., RAVENSBERG, W. J., and URBANEJA, A.: Biological control using invertebrates and microorganisms: plenty of new opportunities. *BioControl* 63, 39–59 (2018)
- WBA: Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung – Gutachten. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (WBA) 2015
- WBA, WBD und SRU: Kurzstellungnahme zur Novellierung der Düngeverordnung: Nährstoffüberschüsse wirksam begrenzen. Berlin: Wissenschaftliche Beiräte für Agrarpolitik (WBA) und für Düngungsfragen (WBD) beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) und Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2013
- WBAE: Für eine gemeinwohlorientierte Gemeinsame Agrarpolitik der EU nach 2020: Grundsatzfragen und Empfehlungen. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz (WBAE) beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2018
- WBAE und WBW: Klimaschutz in der Land- und Forstwirtschaft sowie den nachgelagerten Bereichen Ernährung und Holzverwendung. Gutachten. Berlin: Wissenschaftlicher Beirat für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz (WBAE) und Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (WBW) beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2016
- WBVE und WBA: Politikstrategie Food Labelling. Berlin: Wissenschaftliche Stellungnahme der Wissenschaftlichen Beiräte für Verbraucher- und Ernährungspolitik sowie Agrarpolitik des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 2011
- WDR: 6.000 Bauern protestieren in Münster gegen neue Düngeverordnung. WDR Bericht vom 4. 4. 2019. <https://www1.wdr.de/nachrichten/westfalen-lippe/demo-landwirte-duengeverordnung-muenster-100.html> 2019
- WHO: Obesity: Preventing and Managing the Global Epidemic. Geneva: WHO Technical Report Series 894, World Health Organization (WHO) 2000
- WILLETT, W., ROCKSTRÖM, J., LOKEN, B., SPRINGMANN, M., LANG, T., VERMEULEN, S., GARNETT, T., TILMAN, D., DECLERCK, F., WOOD, A., JONELL, M., CLARK, M., GORDON, L. J., FANZO, J., HAWKES, C., ZURAYK, R., RIVERA, J. A., VRIES, W. DE, MAJELE SIBANDA, L., AFSHIN, A., CHAUDHARY, A., HERRERO, M., AGUSTINA, R., BRANCA, F., LARTEY, A., FAN, S., CRONA, B., FOX, E., BIGNET, V., TROELL, M., LINDAHL, T., SINGH, S., CORNELL, S. E., SRINATH REDDY, K., NARAIN, S., NISHTAR, S., and DECLERCK, F.: The Lancet Commissions Food in the Anthropocene: the EAT – Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* S0140–6736 (2019)
- WILLIAMS, J., DAILY, G., NOBLE, A., MATTHEWS, N., GORDON, L., WETTERSTRAND, H., DECLERCK, F., SHAH, M., STEDUTO, P., FRAITURE, C. DE, HATIBU, N., UNVER, O., BIRD, J., SIBANDA, L., and SMITH, J.: Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability. *Ambio* 46, 4–17 (2017)
- WOLFERT, S., GE, L., VERDOUW, C., and BOGAARDT, M. J.: Big data in smart farming – A review. *Agricultural Systems* 153, 69–80 (2017)
- ZÜHLSDORF, A., JÜRKENBECK, K., and SPILLER, A.: Lebensmittelmarkt und Ernährungspolitik 2018: Verbrauchereinstellungen zu zentralen lebensmittel- und ernährungspolitischen Themen. Göttingen: Zühlsdorf und Partner 2018

Prof. Dr. Regina BIRNER
Fachgebietsleiterin
Universität Hohenheim
Fachgebiet Sozialer und institutioneller Wandel
in der landwirtschaftlichen Entwicklung (490c)
Gebäude 8015

Wollgrasweg 43
70599 Stuttgart
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 711 45923517
Fax: +49 711 45923812
E-Mail: Regina.Birner@uni-hohenheim.de

Biomasse als erneuerbarer Energieträger

Bärbel FRIEDRICH ML (Berlin)



Zusammenfassung

Um das Ziel der Energiewende zu erreichen, das bis 2050 eine weitgehende Einstellung der Nutzung fossiler Energieträger vorsieht, ist eine nachhaltige, klimaschonende Energieversorgung unerlässlich. Vom gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland werden derzeit 12,6% aus regenerativen Ressourcen gedeckt. Daran haben aus Biomasse gewonnene Produkte einen Anteil von etwa zwei Drittel, gefolgt von Windkraft und Photovoltaik. Es wird das Potential der Biomasse bezüglich der Verfügbarkeit, ihrer Flächeneffizienz und Treibhausgasbilanz sowie der ökologischen Folgen diskutiert. Anhand einer Leopoldina-Studie aus dem Jahr 2012/13 wird gezeigt, dass der Beitrag von Bioenergie aus Biomasse in Deutschland nicht beliebig gesteigert werden kann. Gleichwohl zeigen Erkenntnisse der molekularbiologischen Forschung zur Photosynthese und damit gekoppelter katalytischer Prozesse neue Wege zu einer solar getriebenen Produktion von Brennstoffen wie Wasserstoff und Vorstufen zu chemischen Synthesen auf. Dieser viel versprechende Pfad, als „Künstliche Photosynthese“ in einer 2018 erschienenen Akademien-Stellungnahme beschrieben, könnte langfristig in ein nachhaltiges erneuerbares und klimafreundliches Energiekonzept münden.

Abstract

A sustainable, climate-friendly supply of energy is crucial for achieving energy transition by substantial replacement of fossil energy carriers until 2050. Of the total amount of primary energy consumption in Germany, 12.6% are derived from renewable resources, consisting of about two thirds of products generated from biomass, followed by the usage of wind energy and photovoltaic. The potential of biomass is going to be discussed with regard to its availability, land use efficiency, green house gas emission and its impact on biodiversity. Possibilities and limits of bioenergy from biomass will be depicted in more detail. Based on a Leopoldina study of 2012/13, it is concluded that contribution of bioenergy from biomass cannot be extended significantly in Germany. However, basic research of the molecular function of biological photosynthesis and its catalytic processes open novel insights into the production of new solar powered fuels such as hydrogen and precursors for chemicals syntheses. This promising route, addressed as “artificial photosynthesis” in a recent academy report (2018) could contribute to future sustainable, climate friendly energy concepts.

1. Einleitung

Der Reigen dreier Vorträge, die das Thema erneuerbare Energien zum Inhalt haben, wird eröffnet mit der Diskussion des biogenen Energieträgers Biomasse und seinem Beitrag zur Energiewende. Es werden folgende Punkte erläutert: der Einsatz der Biomasse, ihre Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit sowie das zukünftige Potential im Hinblick auf eine nachhaltige und klimafreundliche Energieversorgung, fokussiert auf Deutschland. Die Grundlage der Ausführungen bilden drei Stellungnahmen, an denen die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina in den vergangenen sechs Jahren mitgewirkt hat. *Erstens*: Die von der Leopoldina erarbeitete Studie *Bioenergie: Chancen und Grenzen* von 2012/2013 (*German National Academy of Sciences Leopoldina* 2012, *Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* 2013). *Zweitens*: Die 2018 zusammen mit *acatec* und der Union der Deutschen Akademien herausgegebene Stellungnahme *Künstliche Photosynthese* (*acatech et al.* 2018). Sie bildet das Hauptgewicht des dreiteiligen Vortragsclusters, zu dem der Sprecher der betreffenden Arbeitsgruppe, Professor Matthias BELLER aus Rostock, sowie ein weiteres Mitglied der Arbeitsgruppe, Professor Tobias ERB aus Marburg, weitere Ausführungen machen werden. *Drittens*: Darüber hinaus wird die Stellungnahme *Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende*, entstanden in dem Akademienprojekt *Energiesysteme der Zukunft „ESYS“* (*acatech et al.* 2017), mit in die Diskussion einbezogen. In der letztgenannten Studie wird überzeugend ausgeführt, dass mehrere Phasen der Energiewende erforderlich sind, um das im Pariser Abkommen vereinbarte Klimaziel zu erreichen. In einem integrierten Konzept werden erneuerbarer Strom, synthetische Kraftstoffe und fortentwickelte Bioenergien eine Rolle spielen. Ob fossile CO₂ emittierende Energieträger zukünftig ganz ausgeschlossen werden können, wird letztlich auch eine Frage der ökonomischen Machbarkeit sein.

2. Die Entwicklung der weltweiten Energieversorgung

Betrachtet man den Primärenergiebedarf, d.h. die Summe aller Energien, zunächst global, so ist festzuhalten, dass der Weltenergiebedarf sich von 1973 bis 2014 verdoppelt hat und eine weitere Verdopplung bis 2050 zu erwarten ist. Nach Angaben der Internationalen Energie Agentur (*International Energy Agency, IEA*) nahm die Versorgung mit Primärenergie zwischen 1973 und 2016 von 6115 auf 13761 Millionen Tonnen Öläquivalent zu. Das entspricht einer Steigerung um das 2,5-fache bzw. durchschnittlich 2,5% pro Jahr (Tab. 1).

Tab. 1 Primärenergie-Versorgung^[a] nach Energieträgern, Anteile in Prozent, Gesamtversorgung in Mio. t Öl-äquivalent, weltweit 1973 und 2016

Energieträger	1973	2016
	Anteile, in Prozent	
Öl ^[b]	46,1	31,9
Kohle ^[c]	24,5	27,1
Gas	16,0	22,1
Biomasse, Biogas, biologisch abbaubare Abfälle ^[d]	10,6	9,8
Kernenergie	0,9	4,9
Wasserkraft	1,8	2,5
neue erneuerbare Energien ^[e]	0,1	1,6
insgesamt	100,0	100,0
	Mio. t Öläquivalent	
insgesamt	6115	13761

Quelle: <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52741/primaerenergie-versorgung>
 Beruhend auf IEA World Energy Balances database © OECD/IEA 2018, www.iea.org/statistics; International Energy Agency (IEA): Key World Energy Statistics © OECD/IEA 2008.

[a] Primärenergie ist die von noch nicht weiterbearbeiteten Energieträgern stammende Energie. Primärenergieversorgung = Primärenergieproduktion + Importe – Exporte +/- Veränderung der Lagerbestände.

[b] Einschließlich Ölschiefer und Ölsand.

[c] Einschließlich Torf und Torfprodukte.

[d] Größtenteils „erneuerbar“; Biomasse einschließlich Biokraftstoffe; Abfälle ohne Industrieabfälle.

[e] Geothermische Energie, Solarenergie, Windenergie, Meeresenergie (z. B. Gezeiten- und Wellenkraftwerke).

Die Nutzung fossiler Energieträger wie Öl (31,9%), Kohle (27,1 %) und Erdgas (22,1 %) unter Einbeziehung von Kernenergie (4,9%) macht noch heute etwa 85% des globalen Primärenergieverbrauchs aus (Tab. 1). Dabei dienen lediglich 3% der fossilen Ressourcen der chemischen Industrie zur Synthese von Wertstoffen wie Düngemittel, Polymere und Pharmaka (*acatech* et al. 2018). Der Rest der fossilen Energieträger wird für Wärme, Strom und Mobilität genutzt. 2016 betrug der Anteil an Biomasse, Biogas und biologisch abbaubaren Abfällen am weltweiten Primärenergie-Verbrauch 9,8%, damit ist er gegenüber 1973 leicht gesunken (Tab. 1). Während die Wasserkraft (2,5%) in dem betreffenden Zeitraum moderat gestiegen ist, verzeichnen die „neuen erneuerbaren“ Energien, die Geothermie, Solar-, Wind- und Meeresenergie umfassen, den rasantesten Anstieg.¹

Fazit: Weltweit wuchs in den vergangenen 43 Jahren der Anteil der neuen erneuerbaren Energien am globalen Primärenergieverbrauch um das 16-fache und verzeichnete damit die stärkste Wachstumsrate.

3. Bedeutung der Biomasse bezüglich der Energieversorgung in Deutschland

Der Primärenergieverbrauch in Deutschland hat von 1990 bis 2017 um knapp 8% abgenommen. Noch immer dominieren Mineralöl, Steinkohle und Braunkohle das Energiegeschehen. Der Verbrauch dieser fossilen Ressourcen, ähnliches gilt auch für die Kern-

¹ <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52741/primaerenergie-versorgung>.

energie, nimmt jedoch im Gegensatz zu Erdgas ab (Abb. 1, Referenz: BMWi). Ab 2000 ist ein Anstieg von Wind- und Wasserkraft erkennbar, auch die Produkte der Biomasse steigen an und pendeln dann auf einem konstanten Niveau, das den Verlauf der anderen erneuerbaren Energien übersteigt. Biomasse als Energieträger umfasst tierische und pflanzliche Substanzen, die zur Gewinnung von Wärmeenergie, Strom und Kraftstoffen Verwendung finden.

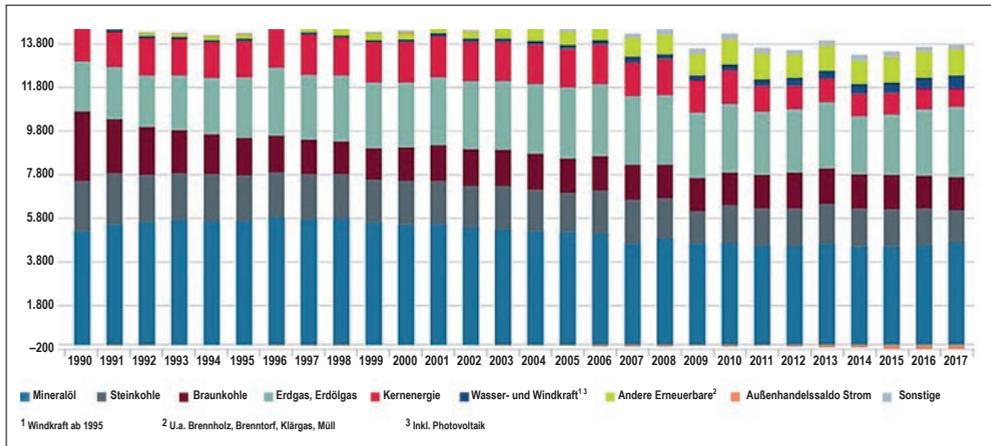


Abb. 1 Zusammensetzung der Energieträger am Primärenergieverbrauch in Deutschland von 1990 bis 2017 (Quelle: BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie]. Infografik Energiedaten und -szenarien 1. 8. 2018)

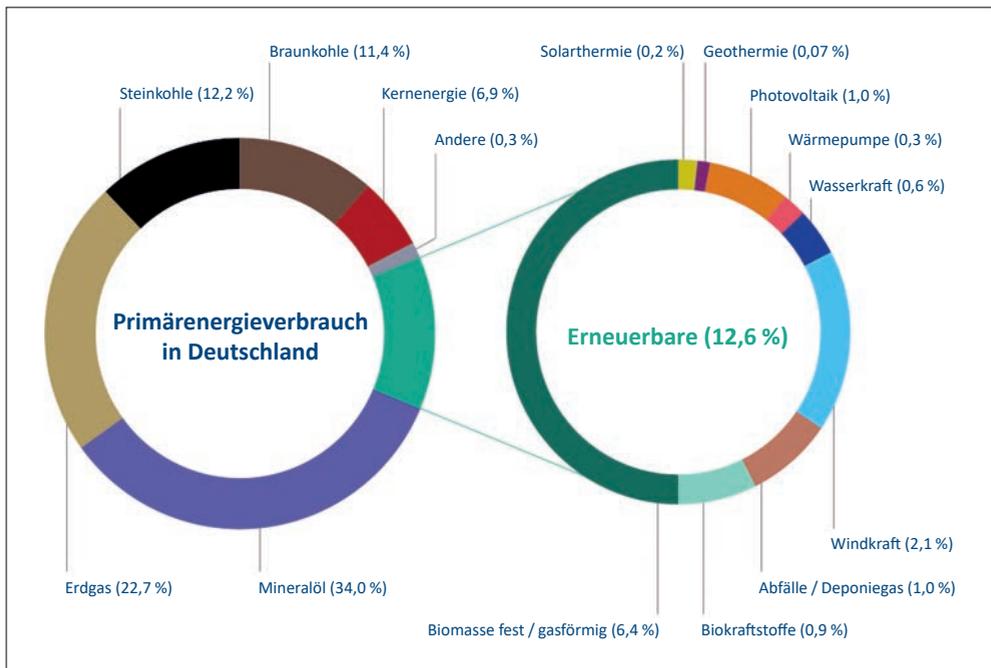


Abb. 2 Nach Energieträgern gestaffelter Primärenergieverbrauch in Deutschland (Referenz: acatech et al. 2018)

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, betrug 2017 der Anteil erneuerbarer Energieträger am gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland 12,6%. Interessant ist die Feststellung, dass biogene Energieträger, wie feste Biomasse, Biogas und Biokraftstoffe, die allesamt speicherbar sind, etwa zwei Drittel (knapp 8%) davon ausmachen.

Der überwiegende Teil der biogenen Energieträger, insbesondere Holz, wird für Wärme (64%) genutzt. Aus Stärke- und Ölpflanzen, wie Mais, Raps und Palmöl, den sogenannten Energiepflanzen, wird Bioethanol und Diesel (14%) produziert. Rest- und Abfallstoffe aus einem heterogenen Gemisch von Restholz, Stroh, Gülle, verworfenen Lebensmitteln, etc., werden vorwiegend zu Biogas und Elektrizität umgesetzt (Referenz: BMWi).

Betrachtet man dagegen allein die Stromerzeugung, so ergibt sich ein anderes Bild. Inzwischen werden 33% des elektrischen Stromverbrauchs von 654 Twh (Mrd. kwh) in Deutschland aus erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt. Dies ist eine bemerkenswerte Steigerung. Ferner liegen hier Windenergie und Photovoltaik mit ca. 22% deutlich über dem Ertrag aus Biomasse von 7%.

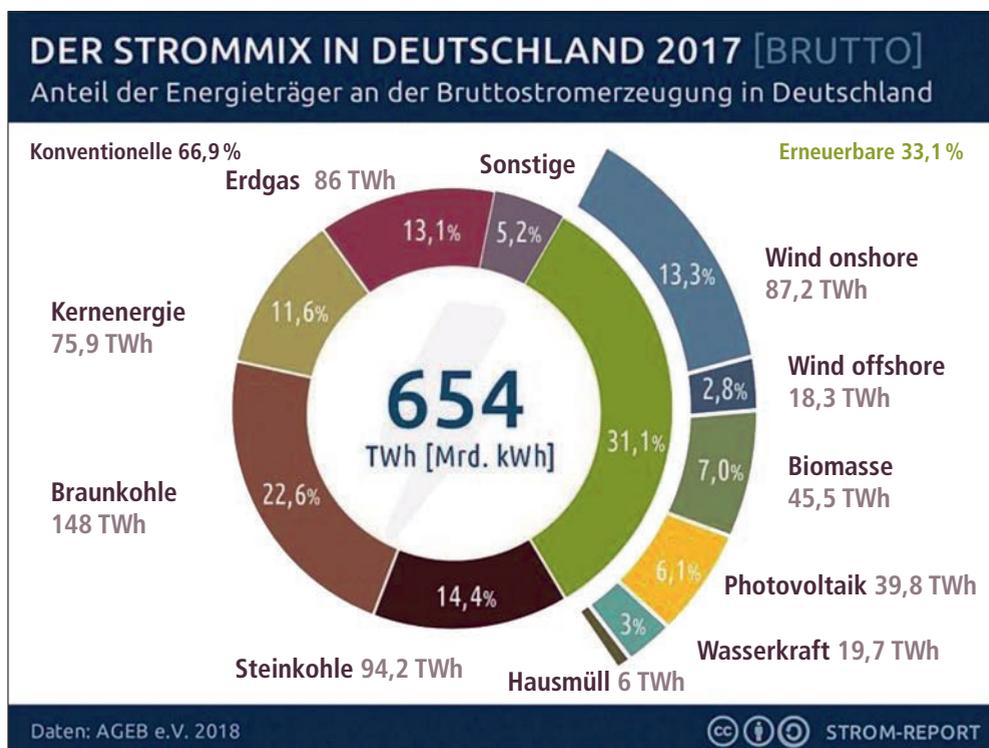


Abb. 3 Erneuerbare Energieträger für die Stromerzeugung

Fazit: Der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Primärenergieverbrauch in Deutschland betrug 2017 rund 12,6%. Davon machten biogene Energieträger (Holz, Energiepflanzen sowie tierische und pflanzliche Abfallstoffe) zwei Drittel aus. Im gleichen Zeitraum war der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix mit 33% erheblich höher. Der Beitrag der Biomasse hierzu betrug allerdings nur 7%.

4. Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit von Biomasse

Der Einsatz von Biomasse hängt wesentlich von zwei Faktoren ab: der Verfügbarkeit von Landflächen und der Nachhaltigkeit im Hinblick auf die vereinbarten Klimaziele. Letztere sehen vor, mindestens unter 2 °C Erderwärmung zu bleiben und folglich ökologische Schäden und eine Minderung der Biodiversität zu vermeiden.

2008 betrug das Biomasseaufkommen aus Agrar- und Forstwirtschaft global 13 Mrd. Tonnen. Von der gesamten terrestrischen Fläche (13,4 Mrd. ha) waren zu diesem Zeitpunkt 3,9 Mrd. ha mit Wald bedeckt, während 5 Mrd. ha landwirtschaftlich genutzt wurden (Abb. 4). Von diesen Agrarflächen dienten 70% als Weideland zum Zwecke der Tierhaltung, und der Rest wurde als Ackerland genutzt. Von den Ackerflächen wurde wiederum ein hoher Anteil (70%) für die Gewinnung von Futtermitteln und nur 19% zur Produktion von Nahrungsmitteln eingesetzt. Auf etwa 10% der Ackerfläche wurden Bioenergie- und stoffliche Biomasseproduktion betrieben (Abb. 4). Um die wachsende Weltbevölkerung zu ernähren, ist davon auszugehen, dass bis 2050 der Anteil an Biomasse für Ernährungszwecke verdoppelt werden muss. Dies bedeutet, die Agrarflächen für die energetische Nutzung von Biomasse sind weltweit begrenzt.

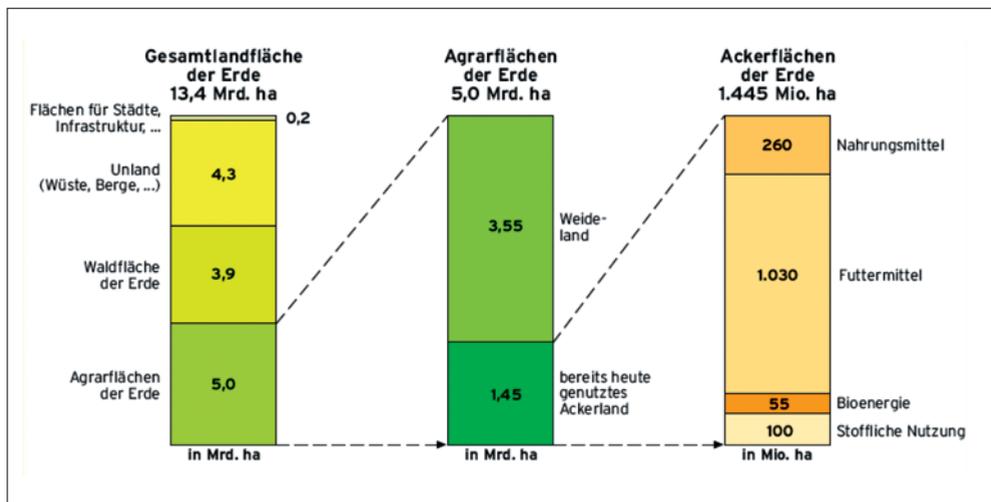


Abb. 4 Weltweite Landnutzung (Quelle: RASCHKA und CARUS 2012, S. 21, Grafik: nova-Institut.eu 2011)

Wie ist es um die Verfügbarkeit von Land und Biomasse in Deutschland bestellt? Deutschland nimmt 0,24% der globalen terrestrischen Fläche ein ($357 \times 10^9 \text{ m}^2$), hat allerdings einen Anteil von 2,8% des globalen primären Energieverbrauchs für eine Bevölkerung von 82 Mio. Diese repräsentiert 1,17% der Weltbevölkerung (*German National Academy of Sciences Leopoldina* 2012).

Tab. 2 Verfügbarkeit von terrestrischer Biomasse in Deutschland

Fläche	% der Gesamtfläche	Mio. Tonnen C pro Jahr
Wald	30	14
Felder	34	53
Wiesen + Weiden	24	+ 20 Stroh und +20 abgeweidet
Infrastruktur	12	

Tabelle 2 gibt Aufschluss über die Verteilung der terrestrischen Flächen in Wald, Felder und Wiesen, die insgesamt einen Anteil von 88% der Gesamtfläche ausmachen. Den Rest beansprucht die Infrastruktur. Die geerntete Biomasse auf Feldern beträgt rund 53 Mio. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr. Stroh und Grasland sind vorwiegend für die Tierhaltung erforderlich. Von dem Ertrag der Biomasse werden 90% für Nahrungsmittel, Tierfutter und industrielle Produkte verwendet. Im Jahr 2008 wurden von der Biomasse, die direkt als Energiequelle zur Herstellung von Bioethanol, Diesel, Biogas und Strom genutzt wurde, ungefähr 20% importiert, während die restlichen 80% aus deutschen Biomasseprodukten gewonnen wurden. Dieser inländische Beitrag war nur möglich, weil Deutschland zusätzliche Biomasse für Tierfutter importiert hat. Der Import dieser Biomasse löst das Problem jedoch nicht, sondern verlagert es lediglich in andere Länder (Referenz: *German National Academy of Sciences Leopoldina 2012, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2013*).

Im Hinblick auf Nachhaltigkeit stellt sich die Frage, ob Biomasse als Energieträger klimaneutral ist, d. h., ob zwischen Assimilation von CO₂ infolge der Photosynthese und der Emission von CO₂, bedingt durch Kultivierungs- und Ernteprozesse, ein Gleichgewicht besteht. Hier sind neben Kohlendioxid auch Stickoxide und Methan als Treibhausgase zu berücksichtigen. Tabelle 3 zeigt, dass Wiesen und besonders Wälder viel CO₂ aufnehmen, nicht aber Ackerland, das über eine intensive Bewirtschaftung, inklusive Tierhaltung, fossile Quellen für Düngemittel, Transport und Maschinen viel Energie verbraucht. Dabei entstehen nicht nur große Mengen an CO₂, sondern Stickoxide und Methan, die um einen 300-fachen bzw. 25-fachen Faktor klimaschädigender sind als Kohlendioxid. Die Bilanzierung (Tab. 3) kommt zu dem Schluss, dass Wälder eine beachtliche Senke für CO₂ darstellen, auch Wiesen sind bis zu einem gewissen Grad – abhängig von der Bearbeitung – klimagünstig, nicht jedoch intensiv genutzte Ackerflächen.

Tab. 3 Emission von Gasen auf unterschiedlich genutzten Standorten

	CO ₂ aus Bodenkohlenstoff	CO ₂ aus fossilen Brennstoffen	Treibhausgase aus Ernteresten	N ₂ O und CH ₄ ^[a]	Σ
Ackerland	4%	11%	14%	12%	41%
Wiesen/Weiden	-26%	7%	18%	20%	19%
Wälder	-32%	3%	21%	1%	-7%

Quelle: *German National Academy of Sciences Leopoldina 2012*, modifiziert.

[a] Emissionen aufgrund des Einsatzes von Düngemitteln.

Fazit: Weltweit, und dies gilt auch für Deutschland, ist die verfügbare Fläche zur Gewinnung von Biomasse für energetische Zwecke begrenzt. Sie steht in Konkurrenz zur Produktion von Nahrungsmitteln. Reststoffe und Holz sind noch die günstigsten Ressourcen für biogene Energieträger, auch unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit, Klimaneutralität und ökologischen Verträglichkeit.

5. Biogene Treibstoffe

Die Leopoldina kommt in der Stellungnahme *Bioenergie: Chancen und Grenzen* (German National Academy of Sciences Leopoldina 2012, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2013) aus den zuvor dargelegten ökologischen und klimarelevanten Gründen zu dem Schluss, dass die Produktion von Bioethanol und Diesel aus Stärke und Zucker, gewonnen aus Energiepflanzen, in Deutschland nicht weiter vorangetrieben werden sollte. In der Stellungnahme wird jedoch empfohlen, dass die Produktion von Bioethanol und Biogas aus Rest- und Abfallstoffen in kleineren dezentralen Anlagen durchaus vertretbar ist.

Laut dem Bundesverband der Deutschen Bioethanolwirtschaft e.V. (Bioethanolproduktion seit 2005, www.bdbe.de) produzierten sieben Bioethanolwerke in Deutschland 2017 insgesamt 672 930 t Bioethanol. Darunter befindet sich auch die Demonstrationsanlage Clariant.com. in Straubing, die nach dem „Sunliquid[®]“-Verfahren (Abb. 5) aus 4500 t Weizen- und Maisstroh 1000 t „Cellulose-Ethanol“ produziert. Dieser Treibstoff wird bereits der zweiten Generation von Treibstoffen zugeordnet, bei denen Holzreste, darunter Lignocellulose, zum Einsatz kommen. Der Prozess bedarf jedoch der Optimierung, die durch neue molekulargenetische Verfahren des *Genome Editing* mit Hilfe von programmierbaren DNA-Nukleasen (Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015) beschleunigt werden könnte.

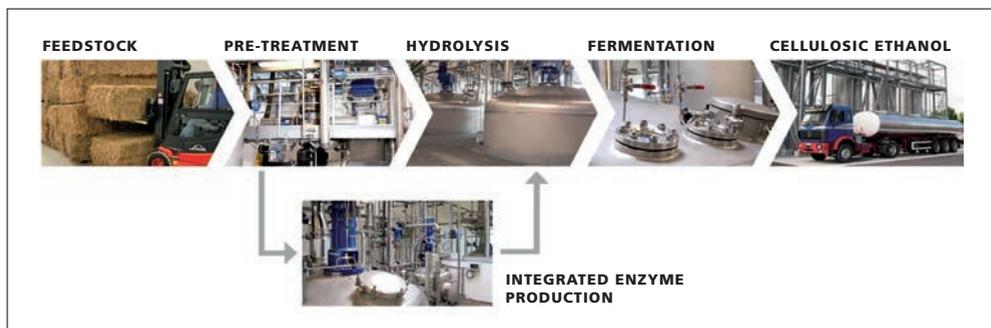


Abb. 5 Das „Sunliquid[®]“-Verfahren zur Herstellung von Bioethanol aus Agrarabfällen. Bei dem „Sunliquid[®]“-Verfahren werden prioritär Cellulose und Lignocellulose zur Herstellung von Bioethanol eingesetzt. Hier wird das Material enzymatisch kostenaufwendig vorbehandelt und das bis dato nicht fermentierbare Lignin verbrannt. Die dabei freigesetzte Prozesswärme wird für die Destillation von Ethanol genutzt. (Quelle: Clariant.com. Cellulosic ethanol from agricultural residues)

Fazit: Insgesamt sieben Bioethanolwerke produzierten im Jahr 2017 insgesamt 672 930 t Bioethanol. Um die Reststoffe, insbesondere Lignin, insgesamt effizient zu nutzen, sind die Verfahren zur Gewinnung dieser biogenen Kraftstoffe weiterzuentwickeln. Dabei könnten neue molekulargenetische Techniken beschleunigend wirken.

6. Vor- und Nachteile der natürlichen Photosynthese

Die gesamte Sonnenenergie, die jährlich auf der terrestrischen Erdoberfläche absorbiert wird, beträgt ungefähr $0,5 \times 10^{24}$ J (entspricht 170 W m^{-2}). Von dieser Energie finden sich weltweit nur etwa 0,5 % in der durch Pflanzen gebildeten Biomasse wieder.

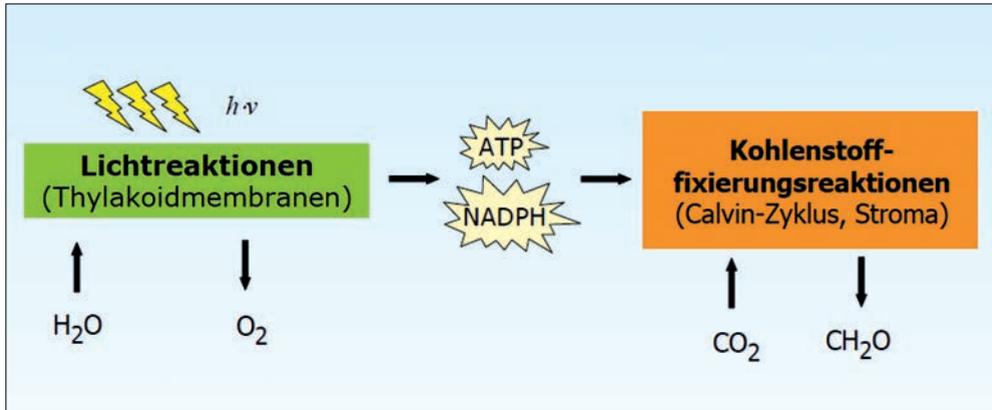


Abb. 6 Reaktionsketten der natürlichen Photosynthese. Hinter den Lichtreaktionen verbergen sich die in Abb. 7 näher dargestellten Komponenten.

Die Effizienz der Photosynthese, hier sind sowohl die Lichtreaktionen als auch die Dunkelreaktionen zu betrachten (Abb. 6), wird gemindert durch vielfältige Faktoren, beispielsweise:

- Nur 47% des Sonnenlichts einer bestimmten Wellenlänge wird von den photosynthetischen Pigmenten der Pflanzen genutzt.
- Nur etwa 10% der absorbierten Lichtenergie wird als Reduktionsäquivalente (NADPH) gespeichert.
- Von dieser Energie geht ein Drittel durch Photorespiration verloren, katalysiert durch die Oxygenase-Funktion der Ribulosebiphosphat-Carboxylase.
- Der bei der Wasserspaltung freigesetzte Sauerstoff schädigt das Photosystem II. Bei hoher Lichtintensität wird das in diesem Komplex enthaltende D1-Protein dreimal pro Stunde ausgetauscht.
- Die evolutive Anpassung an schwankende Lichtintensitäten hat zu einer maximalen Leistungsfähigkeit der Photosynthese von etwa 4,5 % geführt. In der Natur wird jedoch selten eine Leistungsfähigkeit von 1 % erreicht (MICHEL 2012).

Inzwischen hat die Photovoltaik die natürliche Photosynthese in ihrem Wirkungsgrad weit übertroffen. Ideal an das Sonnenlicht angepasste Solarzellen weisen inzwischen eine Effizienz von 33 % auf und wandeln die Solarenergie direkt in elektrische Energie um. Allerdings bleiben Vorteile der durch Photosynthese gewonnenen Biomasse gegenüber Photovoltaik oder Windenergie als Energieträger bestehen. Es sind dies die Speicherfähigkeit und der weite Einsatzbereich. Daraus resultiert die Frage, ob es Möglichkeiten gibt, die Effizienz der natürlichen Photosynthese zu steigern.

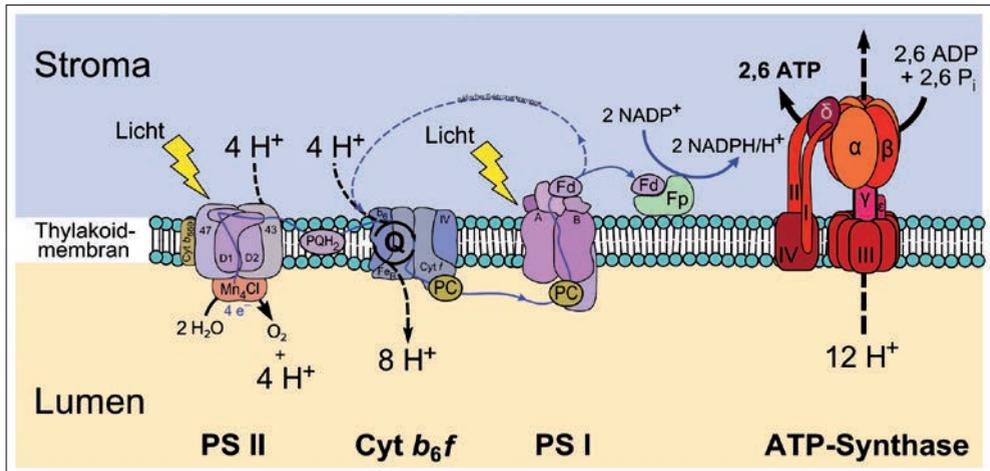


Abb. 7 Komponenten der Energiegewinnung durch Photosynthese. Quelle: Wikipedia: Oxygene Photosynthese. Von Yikrazuul – Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6786668>

Bei der Optimierung der Photosynthese sind zwei räumlich und zeitlich streng koordinierte Prozesse (Abb. 7) zu berücksichtigen:

- In der mehrstufigen Lichtreaktion wird die Energie des Sonnenlichts absorbiert, Wasser wird gespalten, und es kommt zur Ladungstrennung, die zur Freisetzung von Sauerstoff, Protonen und Elektronen führt. Die Reduktionskraft dient der Synthese von NADPH und ATP.
- Diese chemische Energie wird in dem Calvin-Zyklus zur Assimilation von CO_2 in Biomolekülen genutzt. Wo gibt es Ansatzpunkte für eine Optimierung dieses seit etwa 3 Mrd. Jahren evolvierten Prozesses, der in den molekularen Grundlagen inzwischen sehr gut verstanden ist?

Die biologische Photosynthese, hierbei sind sowohl Licht- als auch die Dunkelreaktion eingeschlossen (Abb. 6), ist ein komplexer katalytischer Prozess. Allein an der Lichtabsorption und Energieumwandlung sind mehr als 30 Proteinkomponenten mit zahlreichen Metallzentren, Kofaktoren und Pigmenten beteiligt.

Zwar liegt das theoretische Effizienzmaximum der Lichtreaktionen bei etwa 10% (DAU und ZAHARIEVA 2009), die reale Effizienz erreicht im Jahresmittel bei Nutzpflanzen jedoch weniger als 1%, während Mikroalgen im Photobioreaktor Werte um 3% erreichen (BLANKENSHIP et al. 2011). Erkennbar ist diese Differenz auch an der Produktivität der Biomassebildung. Während Landpflanzen 600 g Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr bilden, produzieren Algen nahezu die 10-fache Ausbeute ($5000\text{ g C m}^2\text{ pro a}$), nicht zuletzt, da sie in einem flüssigen Medium wachsen, wo der Stoffaustausch höher ist. So zielen molekulargenetische Eingriffe darauf ab, durch Modifikationen einmal die Lichtreaktionen zu verbessern und zum anderen die Effizienz der CO_2 -Fixierung zu steigern. Beispiele hierfür sind:

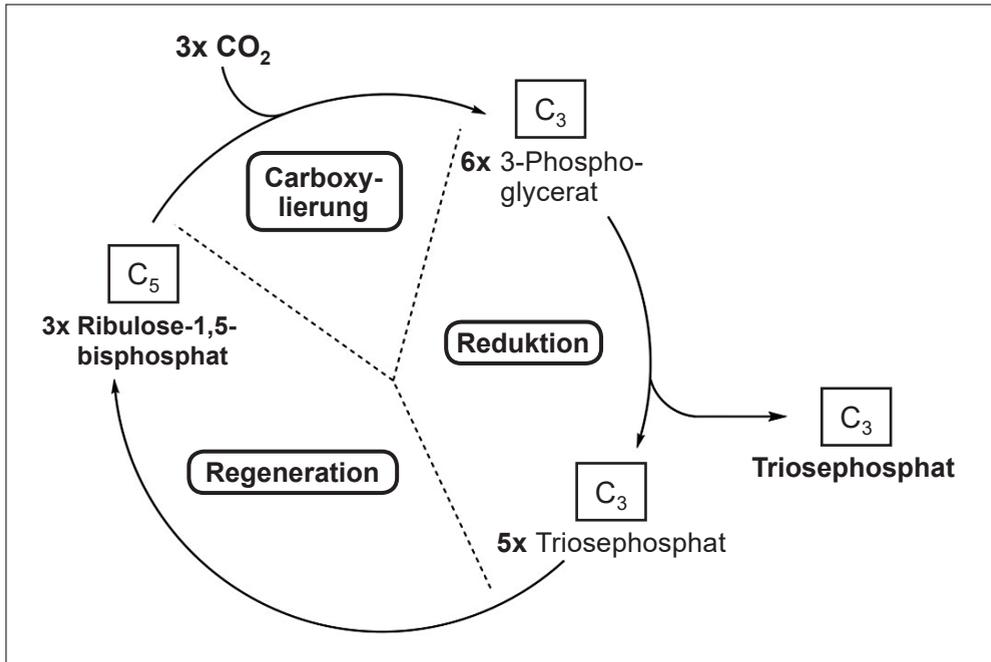


Abb. 8 Photosynthetische Kohlendioxid-Fixierung über den Calvin-Zyklus.² Quelle: Wikipedia: Calvin-Zyklus. CO₂-Fixierung

- Eine direkte molekulare Intervention in die Regulation des Photosyntheseapparates. Dadurch konnte beispielsweise der Ertrag der Biomasse von Tabakpflanzen um 20% signifikant gesteigert werden (KROMDIJK et al. 2016).²
- Die Herabsetzung der Lichtsammelkomplexe im Verhältnis zu den photosynthetischen Reaktionszentren. Dies führte zu einer fünffachen Steigerung der Syntheseleistung (BERNÁT et al. 2009).
- Eine direkte Kanalisierung der photosynthetischen Energie in Wertstoffe wie z. B. Wasserstoff (*acatech* et al. 2018).

Versuche zur Effizienzsteigerung der CO₂-Fixierung konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Optimierung der Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubisCo), die den Calvin-Zyklus mit der CO₂-Assimilationsreaktion einleitet (Abb. 8). Die RubisCo ist das auf der Erde am weitesten verbreitete Enzym, das die katalytische Schwäche besitzt, auch als Oxygenase mit Sauerstoff in der Photorespiration zu reagieren. Dabei entsteht Phosphoglykolat, das energieaufwendig abgebaut werden muss und die Assimilationsbilanz erheblich mindert. Versuche, diese Funktion auszuschalten, waren bisher nicht besonders erfolgreich, so dass andere biosynthetische Strategien entwickelt werden, worüber der nachfolgende Vortrag Einblick gibt.

² Vgl.: <https://de.wikipedia.org/wiki/Calvin-Zyklus>.

Fazit: Jüngste Versuche zeigen, dass auf der Grundlage der inzwischen vorliegenden Erkenntnisse über die molekularen Strukturen und Funktionsweisen der an der Photosynthese beteiligten Komponenten Möglichkeiten bestehen, die Photosynthese zu optimieren. Diese Strategie erhält Auftrieb durch die Verfügbarkeit neuer genetischer Werkzeuge, die anders als in der Vergangenheit, nicht auf wenige Modellsysteme, sondern bei nahezu allen Lebewesen anwendbar sind.

7. Gewinnung von Wasserstoff

Die Stellungnahme zur Bioenergie der Leopoldina von 2012/2013 (*German National Academy of Sciences Leopoldina 2012, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2013*) geht in dem abschließenden Kapitel auf die biosolare Erzeugung von Wasserstoff ein, mit Blick auf Zukunftstechnologien, deren Fortschritte in der neuen Studie zur künstlichen Photosynthese detailliert (*acatech et al. 2018*) dargestellt sind. Das biologische System war stets Ideengeber für die künstliche Photosynthese und hat die Entwicklung von hybriden und rein chemischen Verfahren inspiriert.

Wasserstoff ist in dem zukünftigen Energiegeschehen ein begehrter, einzigartig sauberer Energieträger, dessen Oxidation zur Erzeugung von Wärme oder Elektrizität als alleiniges Produkt Wasser ergibt. Darüber hinaus ist Wasserstoff auch ein wichtiges Reduktionsmittel für industrielle Prozesse wie das Haber-Bosch-Verfahren zur Produktion von Ammoniak als Düngemittel. Derzeit werden 90% des Wasserstoffs aus Erdgas mit einem Wirkungsgrad von 80% und einem Preis von ca. 1 € pro kg H₂ erzeugt. Eine weitere Option bietet die Vergasung von Biomasse, die H₂ zu einem Preis von 7 € pro kg darstellt und nicht nur ökonomisch, sondern auch durch limitierte Biomasse begrenzt ist. Zur Entwicklung einer tragfähigen H₂-basierten Energietechnologie müssten kohlenstoffneutrale Wege aus nicht fossilen Ressourcen zur H₂-Gewinnung erschlossen werden. Am vielversprechendsten ist die Produktion von H₂ durch Elektrolyse von Wasser. Dazu wird der erforderliche Strom aus überschüssiger Wind- oder Photovoltaik-Elektrizität bereitgestellt. Die Kosten für eine Alkali-Elektrolyse-abhängige Produktion belaufen sich auf 3 € pro kg H₂ (*German National Academy of Sciences Leopoldina 2012, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2013*).

Eine weitere Strategie zur Erzeugung von H₂ aus Wasser und Sonnenlicht ist die biosolare H₂-Produktion (RÖGNER 2013). Im Mittelpunkt dieser modellhaften Vision steht die Konstruktion einer Cyanobakterium-Designzelle (Abb. 9). In dieser Zelle wird der durch Photosynthese erzeugte Elektronenfluss aus der Wasserspaltung auf Hydrogenasen dirigiert, die Protonen zu H₂ reduzieren (Abb. 9).

Bei diesem Ansatz sind zwei Voraussetzungen zu beachten:

- Die Hydrogenasen müssen eng an das Photosystem I gekoppelt werden, um die Elektronen in die H₂-Produktion und wenig in die Biomassebildung zu kanalisieren.
- Da bei der Wasserspaltung O₂ freigesetzt wird, müssen die Hydrogenasen sauerstofftolerant sein (FRIEDRICH et al. 2011).

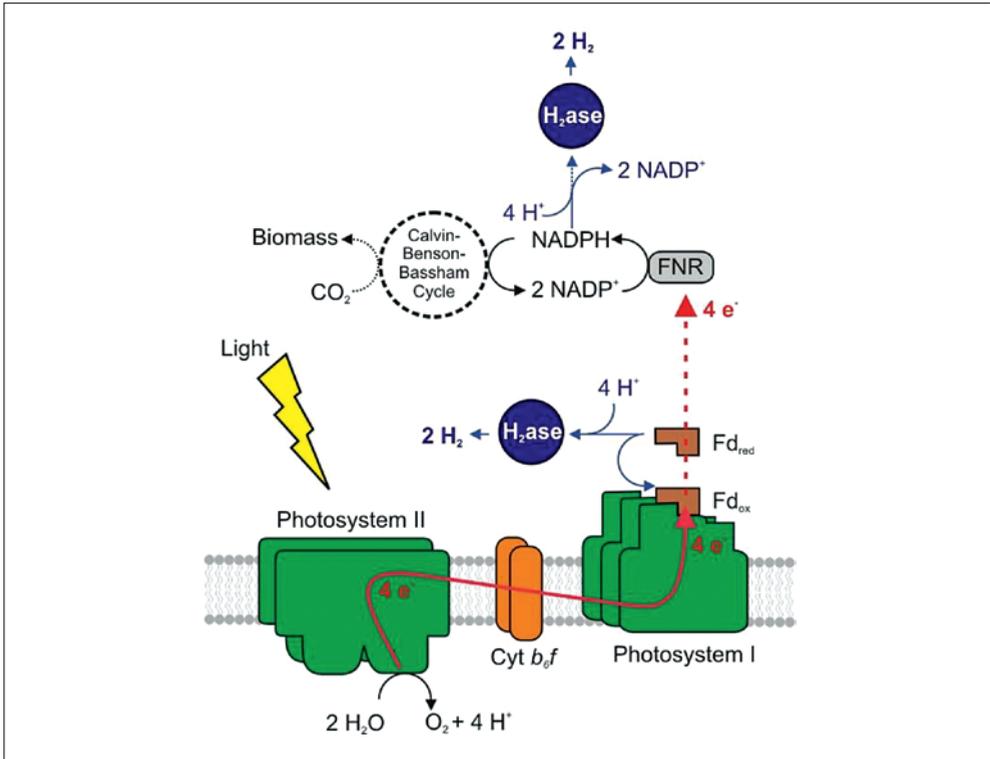


Abb. 9 Eine Cyanobakterium-Designzelle für biosolare Wasserstoffbildung (nach FRIEDRICH et al. 2011 modifiziert)

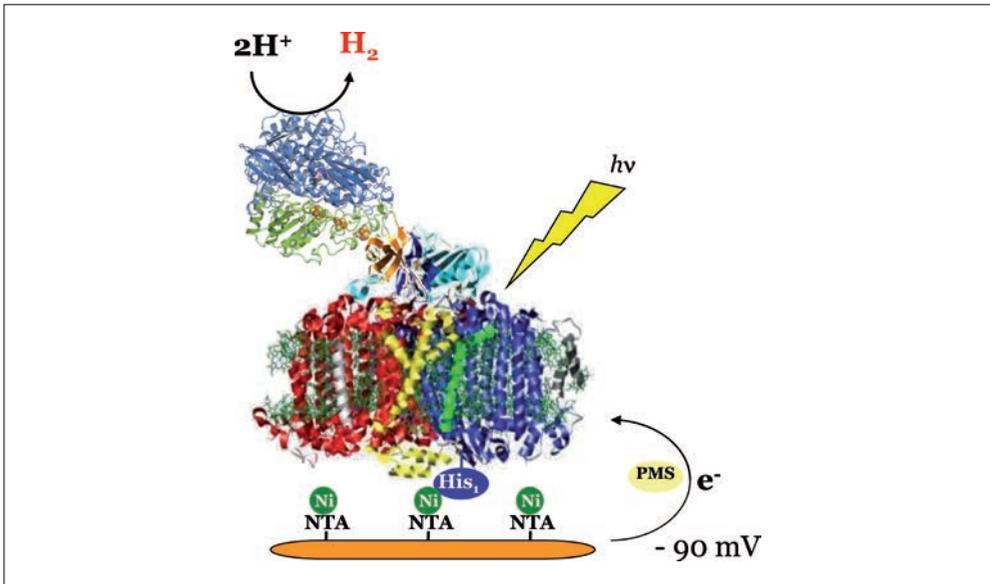


Abb. 10 Lichtgetriebene H₂-Bildung durch ein Hybridprotein bestehend aus Photosystem I und Hydrogenase (nach SCHWARZE et al. 2010, modifiziert)

Auf dem Weg zur Konstruktion einer H₂-produzierenden Designzelle gelang es durch *Genetic Engineering*, eine sauerstoff-tolerante Hydrogenase aus dem Knallgasbakterium *Ralstonia eutropha* mit dem peripheren Teil von Photosystem I zu fusionieren (Abb. 10). (SCHWARZE et al. 2010). Das resultierende Hybridprotein war in der Lage, lichtabhängig H₂ zu bilden (KRASSEN et al. 2009).

Dieses auf der Ebene der Grundlagenforschung bearbeitete System hat Modellcharakter für die Entwicklung zellulärer, semisynthetischer und chemischer Katalysatoren.

Fazit: Wasserstoff ist ein umweltfreundlicher Energieträger. Um H₂-basierte Technologien für die Zukunft zu entwickeln, ist es erforderlich H₂ aus nicht fossilen Ressourcen bereitzustellen. Richtungsweisend sind Elektrolyseverfahren bei denen überschüssiger Strom aus regenerativen Quellen wie Windenergie und Photovoltaik genutzt wird. Biologische Verfahren zur H₂-Produktion sind in der Entwicklung, es ist jedoch fraglich, ob sie für die Massenproduktion tauglich sind. Hier bietet sich die Kopplung der H₂-Bildung mit der Synthese von Wertstoffen an. In diesem Geschehen spielen die H₂ umsetzenden Enzyme, die Hydrogenasen, eine zentrale Rolle.

Literatur

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Stellungnahme. „Sektorkopplung“ – Optionen für die nächste Phase der Energiewende. München 2017
https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2017_11_14_ESYS_Sektorkopplung.pdf
- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Stellungnahme. Künstliche Photosynthese. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven. München 2018
https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2018_3Akad_Kuenstliche_Photosynthese.pdf
- BERNÁT, G., WASCHEWSKI, N., and RÖGNER, M.: Towards efficient hydrogen production: The impact of antenna size and external factors on electron transport dynamics in *Synechocystis* PCC 6803. *Photosynthesis Research* 99, 205–216 (2009)
- BLANKENSHIP, R. E., TIEDE, D. M., BARBER, J., BRUDVIG, G. W., FLEMING, G., GHIRARDI, M., GUNNER, M. R., JUNGE, W., KRAMER, D. M., MELIS, A., MOORE, T. A., MOSER, C. C., NOCERA, D. G., NOZIK, A. J., ORT, D. R., PARSON, W. W., PRINCE, R. C., and SAYRE, R. T.: Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *Science* 332, 805–809 (2011)
- DAU, H., and ZAHARIEVA, I.: Principles, efficiency, and blueprint character of solar-energy conversion in photosynthetic water oxidation. *Accounts of Chemical Research* 42, 1861–1870 (2009)
- FRIEDRICH, B., FRITSCH, J., and LENZ, O.: Oxygen-tolerant hydrogenases in hydrogen-based technologies. *Current Opinion in Biotechnology* 22, 358–364 (2011)
- German National Academy of Sciences Leopoldina (Ed.): Statement. Bioenergy – Chances and Limits. Halle (Saale) 2012
- KRASSEN, H., SCHWARZE, A., FRIEDRICH, B., ATAKA, K., LENZ, O., and HEBERLE, J.: Photosynthetic hydrogen production by a hybrid complex of photosystem I and [NiFe]-hydrogenase. *ACS Nano* 3/12, 4055–4061 (2009)
- KROMDIJK, J., GŁOWACKA, K., LEONELLI, L., GABILLY, S. T., IWAI, M., NIYOGI, K. K., and LONG, S. P.: Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science* 354, 857–861 (2016)
- MICHEL, H.: Vom Unsinn der Biokraftstoffe. *Angewandte Chemie* 124, 2566–2568 (2012)
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina (Hrsg.): Stellungnahme. Bioenergie – Möglichkeiten und Grenzen. Halle (Saale) 2013
https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2013_06_Stellungnahme_Bioenergie_DE.pdf

Bärbel Friedrich

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Deutsche Forschungsgemeinschaft, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Eds.): Stellungnahme / Statement. Chancen und Grenzen des genome editing / The opportunities and limits of genome editing. Halle (Saale) 2015

https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_3Akad_Stellungnahme_Genome_Editing.pdf

RASCHKA, A., und CARUS, M.: Stoffliche Nutzung von Biomasse Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt. Erster Teilbericht zum F+E-Projekt „Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse“. Hürth: nova-Institut GmbH 2012

RÖGNER, M. (Hrsg.): Biohydrogen. Berlin: Walter de Gruyter 2015

SCHWARZE, A., KOPCZAK, M. J., RÖGNER, M., and LENZ, O.: Requirements for construction of a functional hybrid complex of photosystem I and [NiFe]-hydrogenase. Applied and Environmental Microbiology 76/8, 2641–2651 (2010)

Prof. Dr. Bärbel FRIEDRICH
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften
Berliner Büro
Reinhardtstraße 14
14163 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 2038997420
E-Mail: baerbel.friedrich@cms.hu-berlin.de

Neue biosynthetische Ansätze zur Kraft- und Wertstoffgewinnung

Tobias J. ERB (Marburg)



Zusammenfassung

Der erfolgreiche Übergang von einer erdölbasierten industriellen Wertschöpfungskette zu einer nachhaltigen, klimaneutralen Produktion von Kraft- und Wertstoffen ist eine der wichtigsten gesellschaftlichen und ökologischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Die Photosynthese, die die lichtgetriebene Umwandlung von Kohlendioxid (CO₂) in Biomasse ermöglicht, liefert ein natürliches Vorbild, durch das jährlich etwa 420 Gt CO₂ in einem nachhaltigen Kreislauf gebunden werden. Allerdings ist die natürliche Photosynthese bezüglich technischer Nutzbarkeit und katalytischer Effizienz limitiert. So werden weniger als 1 % der Energie des Sonnenlichts in Biomasse konserviert. Darüber hinaus stellt Biomasse ein komplexes chemisches Gemisch dar, das sich nur schwer in die moderne industrielle Wertstoffkette einspeisen lässt. Mit dem Aufkommen der Synthetischen Biologie und der Möglichkeit, lebende Systeme in bisher unbekannter Weise zu analysieren und zu manipulieren, wurden in den letzten Jahren die theoretischen und praktischen Voraussetzungen geschaffen, biologische Systeme mit komplett neuen Eigenschaften zu erzeugen. Diese Entwicklung ermöglichte das Design und die Realisierung neuartiger Biokatalysatoren, künstlicher Stoffwechselnetzwerke und zellbasierter Verfahren zur verbesserten bzw. gezielten Umwandlung von CO₂ in höherwertige Produkte. Exemplarisch werden einige der neuartigen Ansätze und Verfahren zur biosynthetischen Produktion von Wert- und Kraftstoffen aus CO₂ vorgestellt und die Möglichkeiten und Herausforderungen der Synthetischen Biologie als eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts diskutiert.

Abstract

The transition from a petrol-based industry to the sustainable carbon and climate-neutral production of fuels and value-added products is one of the most important social and ecological challenges of the 21st century. Photosynthesis, which uses sunlight to convert carbon dioxide (CO₂) into biomass provides a natural example through which 420 Gt CO₂ are converted in a sustainable fashion. Natural photosynthesis, however, is limited in respect to technical application and catalytic efficiency. As an example, less than 1 % of the energy of the sunlight are conserved in biomass. Besides, biomass represents a complex chemical mixture, which cannot be fed directly into the industrial value-chain. The emergence of synthetic biology, which allows to modify and manipulate living systems in an unprecedented fashion, provided the theoretical and practical base to create living systems with complete new properties. This development enabled the design and realization of biocatalysts, artificial metabolic networks and cell-based processes with improved conversion of CO₂ into value-added products. In the following, examples of novel approaches and processes for the biosynthetic production of fuels and value-added compounds will be presented and the opportunities and challenges of synthetic biology as one of the key technologies of the 21st century will be discussed.

1. Kohlenstoffdioxid: Herausforderung und Chance

Kohlenstoffdioxid (CO_2) ist ein starkes Treibhausgas. Durch menschliche Aktivitäten, vor allem das Verbrennen fossiler Energieträger, ist der Anteil von CO_2 in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution Mitte des 18. Jahrhunderts von ca. 280 auf über 410 ppm im Jahre 2018 angestiegen. Nach heutigem Wissensstand sind die erhöhten CO_2 -Konzentrationen in der Atmosphäre direkt mit dem Phänomen des Klimawandels verbunden, der eine große ökologische, soziale und ökonomische Herausforderung darstellt.

Gleichzeitig ist atmosphärisches CO_2 aber auch eine natürlich verfügbare Kohlenstoffquelle, die im Prinzip als Rohstoff genutzt werden könnte. Dass dies grundsätzlich möglich ist, zeigt die Natur. Durch die Photosynthese wird CO_2 in einem nachhaltigen Kreislauf gebunden und in wertvolle Mehrfachkohlenstoffverbindungen umgewandelt (Abb. 1). Die natürliche Photosynthese hat jedoch Grenzen hinsichtlich technischer Nutzbarkeit und insbesondere auch katalytischer Effizienz.

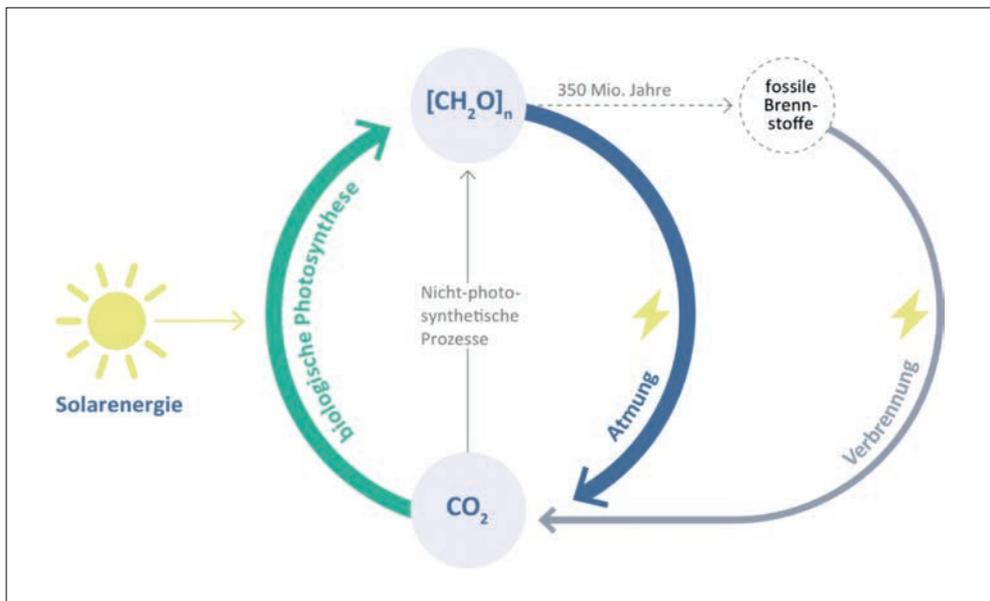


Abb. 1 Die biologische Photosynthese im globalen Kohlenstoffkreislauf. Über die biologische Photosynthese von Bakterien, Algen und Pflanzen werden netto jährlich weltweit ca. 420 Gt CO_2 in Biomasse überführt (grüner Pfeil links). Dies entspricht rund 95% der natürlichen CO_2 -Emissionen (blauer Pfeil rechts). Die für das Gleichgewicht fehlenden 5% werden über nicht-photosynthetische biologische Prozesse in Biomasse konvertiert (dünner Pfeil, Mitte). Zusätzlich zu den natürlichen CO_2 -Emissionen ist die Menschheit für rund 32 Gt CO_2 pro Jahr aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe (grauer Pfeil rechts) verantwortlich, die zu einem Teil in der Atmosphäre verbleiben und damit die CO_2 -Konzentration ansteigen lassen. (Abb. nach *acatech* et al. 2018.)

2. Natürliche Photosynthese: Vorteile und Nachteile

Die biologische Photosynthese ermöglicht die lichtgetriebene Bindung und Umwandlung von unverdichtetem, atmosphärischem CO_2 (0,04 Volumenprozent in Luft) in ener-

getisch höherwertige Mehrfachkohlenstoff-Verbindungen. Durch die natürliche Photosynthese in Pflanzen, Algen und Bakterien werden jährlich etwa 420 Gt CO₂ in Biomasse gebunden. Biologische Systeme, die Photosynthese betreiben, sind zur Selbstreparatur und Selbstvermehrung unter einfachsten Bedingungen befähigt und können sich dynamisch an extreme Standorte und wechselnde Verhältnisse anpassen. Damit ist die natürliche Photosynthese allen zurzeit eingesetzten chemisch-physikalischen Prozessen zur nachhaltigen CO₂-Umwandlung sowohl qualitativ als auch quantitativ überlegen (*acatech* et al. 2018).

Eine Herausforderung für die technische Nutzung der natürlichen Photosynthese ist, dass das CO₂ in Biomasse umgewandelt wird. Biomasse ist ein komplexes Gemisch unterschiedlicher Stoffe (Zucker, Aminosäuren und Nukleinsäuren), das sich nicht direkt in die industrielle Wertstoffkette einspeisen lässt und zunächst aufwändig aufbereitet werden muss.

Ein weiteres Problem ist, dass die natürliche Photosynthese nur einen geringen Wirkungsgrad besitzt. Die Effizienz der Sonnenlichtumwandlung beträgt weniger als 1 %. Mit diesem Wirkungsgrad können unter mitteleuropäischen Lichtverhältnissen jährlich lediglich etwa 7 kWh Solarenergie pro Quadratmeter in nutzbarer Biomasse konserviert werden (*acatech* et al. 2018).

Eine Ursache für den niederen Wirkungsgrad der natürlichen Photosynthese ist, dass unter optimalen Bedingungen, d.h. ausreichender Beleuchtung sowie Stickstoff- und Phosphatversorgung der Pflanze, die Photosynthese durch das zentrale CO₂-umwandelnde Enzym, die Ribulose-1,5-bisphosphat-Carboxylase/Oxygenase (RubisCO), limitiert wird (LONG et al. 2015). Ein durchschnittliches RubisCO-Enzym besitzt eine Umsatzrate von 5 bis 10 CO₂-Molekülen pro Sekunde (<http://brenda-enzymes.org>). Damit ist die RubisCO im Vergleich mit anderen Enzymen des zentralen Kohlenstoffmetabolismus um etwa eine Größenordnung langsamer (BAR-EVEN et al. 2011). Neben CO₂ kann die RubisCO in einer Seitenreaktion auch mit Sauerstoff reagieren, was bei einer durchschnittlichen RubisCO zu einer Fehlerrate von bis zu 20 % führt (WALKER et al. 2016). Diese Fehlreaktion mit Sauerstoff verursacht das Phänomen der Photorespiration, durch das etwa 30 % der photosynthetischen Energie zusätzlich verloren gehen, was den Wachstumsertrag photosynthetischer Organismen begrenzt.

Mit dem Aufkommen der Synthetischen Biologie wurden in den letzten Jahren verschiedene Ansätze entwickelt, die Photosynthese zu modifizieren bzw. hybride Photosynthesysteme zu erzeugen, welche Brenn- und Wertstoffe effizienter und selektiver produzieren als das natürliche Vorbild (Abb. 2).

3. Das Konzept der Synthetischen Biologie

Unter dem Stichwort der Synthetischen Biologie fasst man die Entwicklung der Biologie von einer analytisch-deskriptiven zu einer synthetisch-konstruktiven Disziplin zusammen, bei der biologische Systeme zunächst am Reißbrett geplant und anschließend im Labor realisiert werden. Ein erklärtes Ziel der Synthetischen Biologie ist es, biologische Systeme mit komplett neuen Eigenschaften zu erzeugen. Durch diesen synthetisch-konstruktiven Ansatz werden Biologinnen und Biologen quasi zu Ingenieuren von Molekülen, Zellen bzw. ganzer Organismen (DFG et al. 2009).

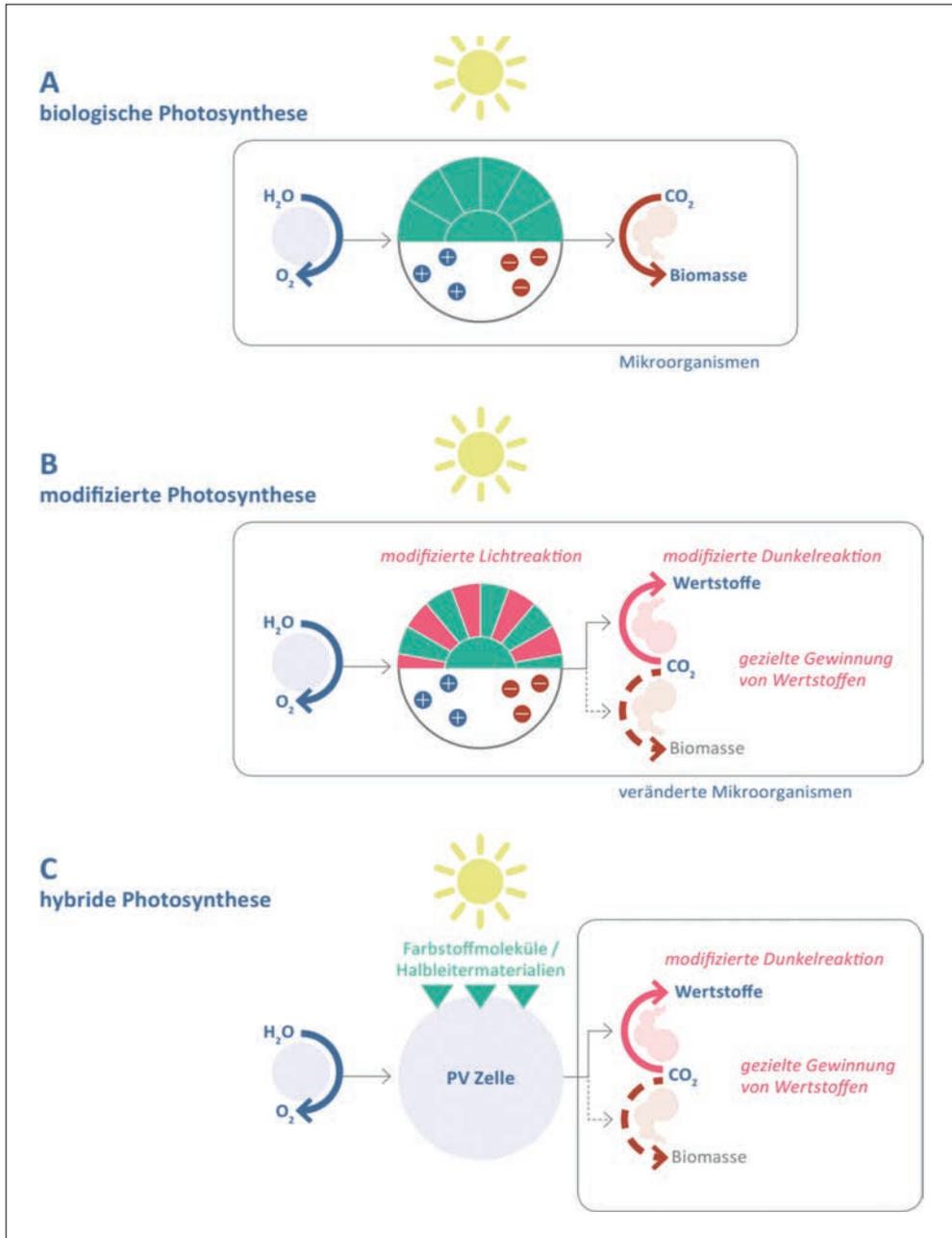


Abb. 2 Biologische, modifizierte und hybride Photosynthese im Vergleich: (A) Ausgangspunkt ist der biologische photosynthetische Organismus. (B) In modifizierten Systemen werden Organismen durch molekulare Techniken verändert, um den Wirkungsgrad der Photosynthese zu erhöhen. Angriffspunkte sind hier eine verbesserte Lichtreaktion sowie eine effizientere CO_2 -Reduktion und die gezielte Umleitung von CO_2 in die Brenn- und Wertstoffproduktion. (C) Bei hybriden Systemen wird ein technischer Prozess (z. B. photovoltaisch getriebene Wasserstoffproduktion) mit CO_2 -reduzierenden Organismen (C rechts umrahmt) gekoppelt. (Abb. nach acatech et al. 2018.)

Zwei Entwicklungen der neueren Zeit spielten für die Entstehung der Synthetischen Biologie eine entscheidende Rolle. Zum einen die Entwicklung der Systembiologie, mit deren Hilfe komplexe biologische Systeme in Raum und Zeit quantitativ erfasst, modelliert und simuliert werden können; zum anderen die Entwicklung neuer technischer Methoden, mit denen komplexe biologische und biologisch-inspirierte Systeme manipuliert bzw. erzeugt werden können (u. a. CRISPR-Technologie, computergestütztes *Engineering* von Proteinen, Mikrofluidik-Technologie).

Dieser Fortschritt der Biologie eröffnet neue Wege, die natürliche Photosynthese in bisher unbekannter Weise für den technischen Gebrauch zu manipulieren oder sogar durch rational entworfene synthetisch-biologische Lösungen zu ersetzen, wie im Folgenden exemplarisch erläutert wird.

4. Modifizierte Photosynthese: Metabolisches *Engineering* von Mikroalgen

Im natürlichen Kontext dient die Photosynthese dem zellulären Wachstum, d. h. der Bildung von Biomasse aus CO₂. Für die technische Nutzung wäre es jedoch wünschenswert, Brenn- und Wertstoffe aus CO₂ zu gewinnen. Darum konzentrieren sich verschiedene Ansätze darauf, den fixierten Kohlenstoff direkt in ein gewünschtes Produkt zu kanalisieren. Dazu bedient man sich vor allem der Methode des metabolischen *Engineerings*, bei dem der Stoffwechsel von Organismen gezielt durch das Einbringen externer Enzyme und Biosynthesewege manipuliert wird (ERB et al. 2017).

Als Modellsystem haben sich in den letzten Jahren Mikroalgen etabliert, die relativ einfach genetisch manipuliert werden können und hohe photosynthetische Ausbeuten auf-

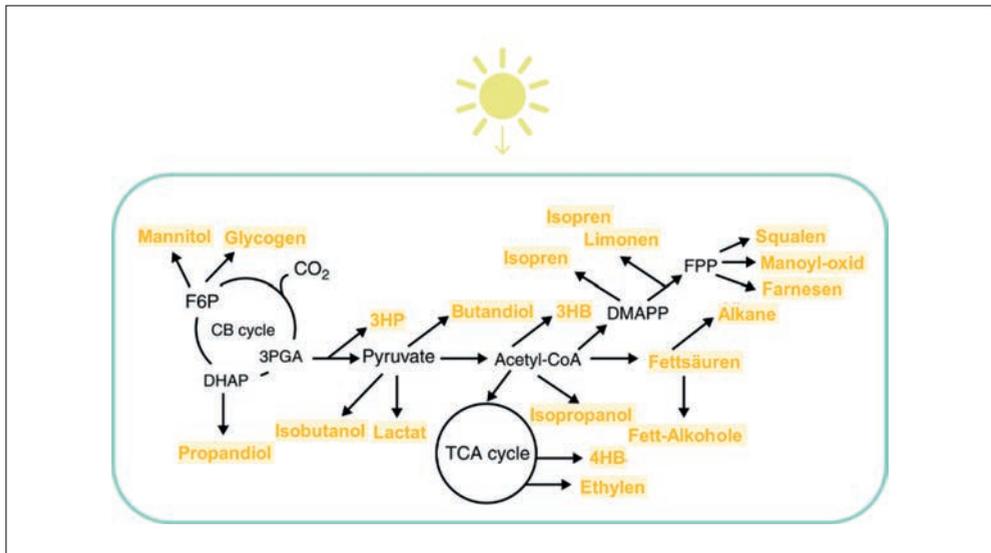


Abb. 3 Produktion von Wertstoffen in Mikroalgen. Verschiedene Wertstoffe (gelb) konnten durch metabolisches *Engineering* des zentralen Kohlenstoffkreislaufs (schwarz) in Mikroalgen im Mikrogramm-je-Liter- bis Gramm-je-Liter-Maßstab produziert werden. (Abb. nach OLIVER et al. 2016.)

weisen. So beträgt die Lichtumwandlungseffizienz dieser Organismen im Photobioreaktor bis zu 3%, mit einem theoretischen Limit von ca. 10%, was Mikroalgen deutlich attraktiver als biotechnologische Produktionsplattformen macht als Pflanzen, deren reale Effizienz bei ca. 0,5% liegt.

Durch das metabolische *Engineering* konnten in Mikroalgen in der Zwischenzeit mehrere Routen für die Herstellung einer Vielzahl verschiedener Moleküle etabliert werden (Abb. 3) (OLIVER et al. 2016). Ein eindrucksvolles Beispiel ist die Gewinnung von 2,3-Butandiol aus der Alge *Synechococcus elongatus* (OLIVER et al. 2013). Zur Produktion dieser nicht-natürli-

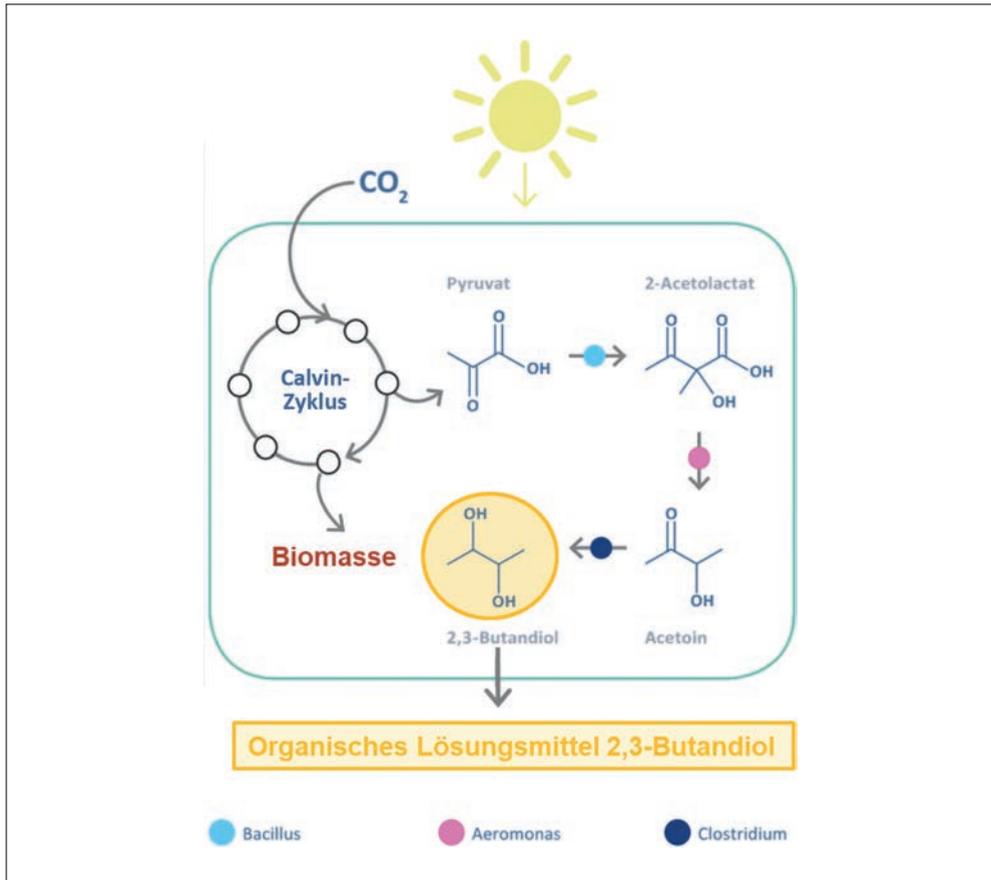


Abb. 4 Gezielte Umprogrammierung des Stoffwechsels der Mikroalge *Synechococcus elongatus* zur Gewinnung von 2,3-Butandiol aus CO₂. 2,3-Butandiol ist ein organisches Lösungsmittel, das in der industriellen Produktion (u. a. zur Herstellung von Farben) eingesetzt wird. Des Weiteren dient es als Ausgangsstoff zur Herstellung von Methyläthylketon, einem weiteren wichtigen industriellen Lösungsmittel, sowie Butadien, einem Grundbaustein von Synthetikgummi. Um Butandiol in *Synechococcus* zu produzieren, wurde ein Stoffwechselweg aus drei Reaktionen in der Mikroalge etabliert. Verschiedene Enzyme wurden getestet, um die beste Dreierkombination, die sich aus Enzymen der Bakteriengattungen *Bacillus*, *Aeromonas* und *Clostridium* zusammensetzt, zu identifizieren. Mithilfe des künstlichen Stoffwechselwegs produziert *Synechococcus* 2,3-Butandiol mit einer maximalen Ausbeute von 2,8 g L⁻¹. Für die industrielle Produktion müssen die 2,3-Butandiol-Ausbeuten in *Synechococcus* aber noch erhöht werden. (Abb. nach *acatech* et al. 2018.)

chen Verbindung, die als Lösungsmittel und Plattformchemikalie in der Polymerproduktion dient, wurde der natürliche Metabolismus der Alge erweitert (Abb. 4). Dazu wurden Enzyme aus drei verschiedenen Mikroorganismen eingebracht, dem Bodenbakterien *Bacillus*, dem Gärbakterium *Clostridium* und dem Proteobakterium *Aeromonas*, die zusammen aus der Brenztraubensäure, einem natürlichen Metaboliten der Mikroalge, 2,3-Butandiol erzeugen.

Die Produktionsausbeuten von 2,3-Butandiol und vieler anderer Verbindungen in Mikroalgen bleiben mit wenigen Gramm pro Liter allerdings noch deutlich hinter den Ausbeuten bereits etablierter, biomassebasierter biotechnologischer Verfahren zurück und sind kommerziell nicht kompetitiv mit chemischen Produktionsverfahren, die Erdöl als Ausgangsmaterial verwenden. Deutlich aussichtsreicher erscheint daher in der Mikroalgen-Biotechnologie die Herstellung hochpreisiger Chemikalien, wie Pharmazeutika oder Duftstoffe, die durch ihren komplexen Charakter in chemisch aufwändigen, mehrstufigen Verfahren synthetisiert werden müssten. Hier ist es durchaus realistisch, dass in den nächsten Jahren biotechnologische Verfahren zur Gewinnung von Spezialchemikalien aus CO₂ entstehen, die kommerzielle Anwendung finden könnten.

5. Synthetische CO₂-Fixierung: Theoretische Überlegungen

Wie im vorangegangenen Absatz diskutiert, ist es durch metabolisches *Engineering* in der Zwischenzeit möglich geworden, den natürlichen Kohlenstoffmetabolismus von photosynthetischen Organismen so zu verändern, dass Wertstoffe in höheren Ausbeuten direkt aus dem Organismus gewonnen werden können. Dennoch löst diese Vorgehensweise nicht das grundsätzliche Problem, dass die CO₂-Aufnahme und -Umwandlung (und damit auch die Produktionsraten) in der natürlichen Photosynthese durch die katalytischen Eigenschaften der RubisCO limitiert werden.

Verschiedene Ansätze konzentrierten sich in der Vergangenheit darauf, die Umsatzrate und/oder die CO₂-Selektivität der RubisCO durch Protein-*Engineering* zu verbessern, um die CO₂-Umwandlung der Photosynthese zu verbessern. Allerdings zeigte sich, dass die beiden Parameter reziprok miteinander gekoppelt sind (ERB und ZARZYCKI 2016), d. h., eine Erhöhung der Umsatzrate verringerte oft die CO₂-Selektivität der RubisCO, während eine Erhöhung der CO₂-Selektivität zu einer Verringerung der katalytischen Aktivität des Enzyms führte, wodurch sich die erzielten Effekte gegenseitig aufheben.

Um die Limitierung der natürlichen Photosynthese zu überkommen, wurden in letzter Zeit radikal neue Lösungen in Betracht gezogen. Ein Ansatz ist es, mit Hilfe der Synthetischen Biologie alternative Prozesse zur photosynthetischen CO₂-Fixierung zu entwickeln, die unabhängig von der RubisCO arbeiten und eine schnellere und effizientere CO₂-Umwandlung erlauben als die natürlich entstandenen Prozesse (SCHWANDER et al. 2016, BAR-EVEN et al. 2010). Die Vorgehensweise bei der Entwicklung und Realisierung solcher künstlichen CO₂-Fixierungsprozesse soll im Folgenden an einem konkreten Beispiel verdeutlicht werden.

In Mikroorganismen wurde kürzlich eine neuartige Klasse hocheffizienter CO₂-fixierender Enzyme entdeckt. Die sogenannten Enoyl-CoA-Carboxylasen/Reduktasen (ECRs) arbeiten bis zu zehnmal schneller und bis zu viermal effizienter als die RubisCO in der natürlichen Photosynthese (ERB et al. 2009). Basierend auf diesen neu entdeckten ECRs wurden in einem Prozess, der dem Prinzip der „Retrosynthese“ aus der Chemie ähnelt, hypothetische Stoffwechselnetzwerke zur kontinuierlichen Umwandlung von CO₂ in or-

ganische Verbindungen wie die Glyoxalsäure oder die Brenztraubensäure entworfen (SCHWANDER et al. 2016). Diese künstlichen Stoffwechselnetzwerke sind in der Entwurfsphase zunächst rein theoretische Überlegungen und berücksichtigen alle potentiell existierenden enzymatischen Reaktionen, ohne sich auf real existierende Enzyme zu beschränken. Die menschliche Intuition und Kreativität, die beim Entwerfen solcher künstlichen Stoffwechselnetzwerke eine wichtige Rolle spielt, wird in der Zwischenzeit immer mehr von Computerprogrammen abgelöst, mit deren Hilfe der mögliche Lösungsraum künstlicher Stoffwechselnetzwerke systematisch erkundet werden kann (ERB et al. 2017).

Aus der Vielzahl der theoretischen Lösungen müssen im nächsten Schritt die vielversprechenden Stoffwechselnetzwerke identifiziert werden. Als wichtiges Auswahlkriterium dienen dabei physikalisch-chemische Attribute der theoretischen Stoffwechselwege, darunter (a) die kinetischen Parameter der einzelnen Reaktionen, die anhand bereits beschriebener enzymatischer Umwandlungen abgeschätzt werden können, (b) die thermodynamische Machbarkeit der einzelnen Netzwerke, die aus der freien Enthalpie der enzymatischen Transformationen abgeschätzt werden kann, sowie (c) die benötigte Gesamtenergie zur Umwandlung von CO_2 in eine organische Kohlenstoffverbindung, die anhand ähnlicher, bereits beschriebener enzymatischer Reaktionen abgeleitet werden kann. In biologischen Systemen wird chemische Energie in Form der Hydrolyse energiereicher Phosphatverbindungen wie Adenosintriphosphat (ATP; ΔG^0 ca. -50 kJ mol^{-1}) bzw. durch die Oxidation von Reduktionsäquivalenten wie Nikotinamiddinukleotidphosphat (NADPH; ΔE^0 ca. -340 mV) bereitgestellt. ATP und NADPH werden durch den photosynthetischen Apparat erzeugt, so dass eine Normierung auf die Anzahl der benötigten Photonen pro fixiertem CO_2 es letztendlich erlaubt, die energetischen Anforderungen der theoretischen Stoffwechselnetzwerke miteinander zu vergleichen.

Im konkreten Beispiel unterschieden sich die entworfenen Stoffwechselnetzwerke zur CO_2 -Umwandlung hinsichtlich Topologie und energetischer Anforderungen deutlich von dem der natürlichen Photosynthese. So erforderte der sogenannte CETCH-Zyklus (Abb. 5), eine der alternativen Lösungen, beispielsweise nur ca. 24–28 Photonen pro produziertem Brenztraubensäure-Äquivalent aus CO_2 , während die natürliche Photosynthese für den gleichen Prozess etwa 32–36 Photonen benötigt (SCHWANDER et al. 2016). Diese Ergebnisse zeigen, dass durch rein theoretische Überlegungen alternative Versionen zur photosynthetischen CO_2 -Fixierung entworfen werden können, die weniger Energie benötigen (und voraussichtlich mit höherer Umsatzrate arbeiten können) als die natürlich entstandene Lösung.

6. Synthetische CO_2 -Fixierung: Praktische Realisierung

Im Anschluss an die Entwurfsphase gilt es dann, das theoretische Stoffwechselnetzwerk zu realisieren (Abb. 1). Dazu müssen die jeweiligen Enzyme gefunden werden, die die erforderlichen Transformationen katalysieren. Durch Literaturrecherche und Analyse von Enzymdatenbanken konnte im konkreten Beispiel die Mehrzahl der erforderlichen Enzyme des CETCH-Zyklus identifiziert werden. In manchen Fällen war es aber notwendig, mehrere Enzymkandidaten zu testen, um ein Enzym der gewünschten Eigenschaft bzw. Stabilität zu erhalten. Nicht für jede Transformation war ein entsprechendes Enzym auffindbar. In diesen Fällen konnte die gewünschte Reaktion mittels Protein-Engineering, d. h. durch gezielten Umbau des aktiven Zentrums eines anderen Enzyms, erzeugt werden. Aus insgesamt 15 verschiedenen Enzymen (inklusive dem maßgeschneiderten Enzym) wurde eine

erste Version des CETCH-Zyklus in einem Reaktionsansatz kombiniert. Das künstliche Stoffwechselnetzwerk wandelte CO₂ unter Verbrauch von ATP und NADPH in Glyoxal-säure und Äpfelsäure um (OLIVER et al. 2013).

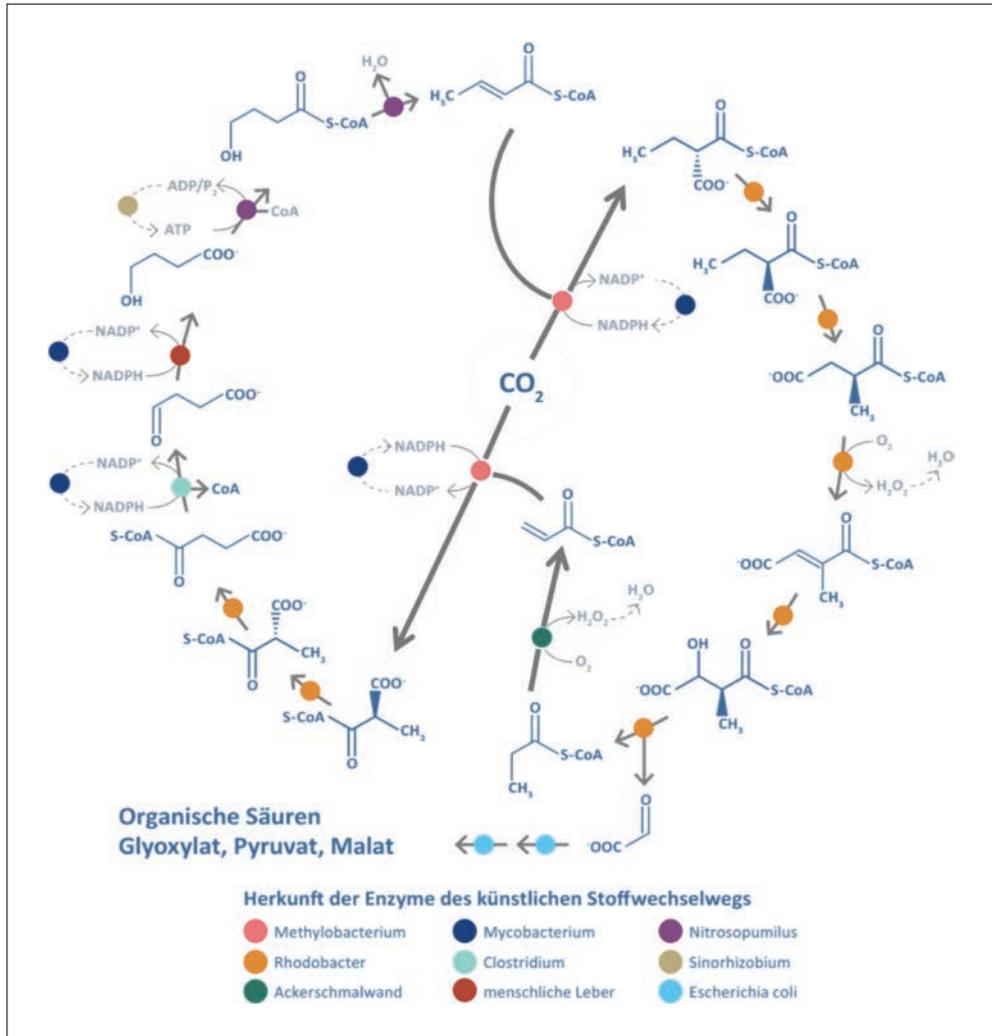


Abb. 5 Der „CETCH-Zyklus“, ein künstlicher Stoffwechselweg zur biologischen CO₂-Reduktion. Das Stoffwechselnetzwerk wurde zunächst am Reißbrett geplant und dann im Labor nach dem „Lego-Prinzip“ aus einzelnen biologischen Komponenten zusammengesetzt. Der CETCH-Zyklus besteht aus 17 verschiedenen Enzymen, die aus insgesamt neun verschiedenen Organismen (*farblich gekennzeichnet*) stammen. Drei dieser Enzyme wurden mit Computerunterstützung maßgeschneidert, um eine entsprechende Reaktion zu katalysieren. Theoretische Berechnungen zeigen, dass der CETCH-Zyklus lediglich 24 bis 28 Lichtquanten pro reduziertem CO₂-Molekül benötigt. Verglichen mit der natürlichen Dunkelreaktion in Pflanzen und Algen (ca. 34 Lichtquanten pro CO₂) braucht der künstliche Stoffwechselweg damit bis zu 20% weniger Lichtenergie. Im Reagenzglas ist der Designer-Stoffwechselweg bereits funktionsfähig, weitere Versuche konzentrieren sich nun darauf, ihn in photosynthetische Organismen und künstliche Zellen zu implementieren. (Abb. nach SCHWANDER et al. 2016.)

7. Synthetische CO₂-Fixierung: Optimierung

Obwohl der CETCH-Zyklus erfolgreich realisiert werden konnte, lagen die erreichten CO₂-Umwandlungsraten des Systems in der ersten Version bei lediglich 0,2 CO₂-Molekülen pro Stunde und Akzeptorsubstrat. Dies erforderte eine weitere Optimierung des künstlichen Netzwerks in mehreren Schritten. Das besondere Augenmerk lag dabei darauf, inhibierende bzw. toxische Zwischenprodukte, die sich im Zyklus anhäuferten, zu minimieren. Durch Zugabe zusätzlicher, detoxifizierender Enzyme, das Ersetzen inkompatibler bzw. problematischer Enzyme sowie das *Engineering* des aktiven Zentrums einiger Enzyme zur Unterdrückung unerwünschter Seitenreaktionen konnte die Effizienz des Netzwerks um den Faktor zwanzig gesteigert werden. Am Ende der Optimierungsphase stand ein System aus insgesamt 17 verschiedenen Enzymen (inklusive drei maßgeschneiderten Enzymen) aus neun unterschiedlichen Organismen, dessen CO₂-Fixierungsrate mit dem der natürlichen Photosynthese *in vitro* vergleichbar ist (SCHWANDER et al. 2016).

8. Synthetische CO₂-Fixierung: Zukünftige wissenschaftliche Herausforderungen

Das konkrete Beispiel des CETCH-Zyklus zeigt, dass es mithilfe der Synthetischen Biologie grundsätzlich möglich ist, einen komplett neuen biologischen Prozess zur CO₂-Fixierung zu realisieren. Die nächste Herausforderung ist nun, diese Prozesse weiterzuentwickeln. Grundsätzlich können hier *Top-down*- von *Bottom-up*-Ansätzen unterschieden werden. Das Ziel von *Top-down*-Ansätzen ist es, künstliche Stoffwechselnetzwerke wie den CETCH-Zyklus in lebende Zellen (Bakterien, Algen und Pflanzen) einzubringen. Dadurch könnten Organismen erzeugt werden, die CO₂ effizienter umwandeln als mit Hilfe der natürlichen Photosynthese. Ein Problem stellt hierbei jedoch die Integration des künstlichen Stoffwechselnetzwerks in den komplexen Gesamtstoffwechsel der Zelle bzw. des Organismus dar. Insbesondere sind es nicht vorhersehbare Wechselwirkungen einzelner Enzyme und Metaboliten des künstlichen Stoffwechselnetzwerks mit den mehr als tausend verschiedenen Enzymen einer Zelle. Technisch kann die Implementierung auf zwei Arten geschehen. Zum einen könnten die entsprechenden Erbgutabschnitte mithilfe molekularbiologischer und gentechnologischer Methoden (CRISPR-Technologie) in Zellen eingebracht werden. Die andere Möglichkeit ist, das benötigte Erbgut zu synthetisieren und in leere Zellhüllen zu transplantieren („Venter-Methode“).

Im Gegensatz dazu wird bei der *Bottom-up*-Strategie das Ziel verfolgt, künstliche Zellen oder zellähnliche Kompartimente zu schaffen, die zur Photosynthese befähigt sind. In Deutschland wird diese Strategie vor allem im Forschungsnetzwerk „MaxSynBio“ der Max-Planck-Gesellschaft untersucht (SCHWILLE et al. 2018). Hier werden grundlegende Methoden zur Herstellung von abgegrenzten Reaktionsräumen in Form von Polymeren, Wasser-in-Öl-Tropfen oder Vesikel durch chemische bzw. physikalische Verfahren wie die Mikrofluidik untersucht. Diese Kompartimente sollen dann durch Licht oder Strom energetisch versorgt werden und Stoffwechselnetzwerke wie den CETCH-Zyklus antreiben, so dass am Ende dieses Prozesses eine künstliche photosynthetische Zelle stehen könnte. Auch wenn die Forschung sich noch im Grundlagenstadium befindet, können hier interessante neue Techniken und Technologien an der Grenzfläche von Chemie, Biologie und Materialwissenschaften entstehen (SCHWILLE et al. 2018).

9. Hybride Photosynthese

Unter der hybriden Photosynthese versteht man Versuche, bei denen technische mit biologischen Systemen gekoppelt werden. Dabei werden die Vorteile technischer Systeme (vor allem hohe Energieumwandlungseffizienz) mit den Vorteilen biologischer Systeme (vor allem Umwandlung und Speicherung von Mehrfachkohlenstoff-Verbindungen) kombiniert, um Produkte bzw. gesteigerte Effizienz zu erreichen, die technisch bzw. biologisch alleine

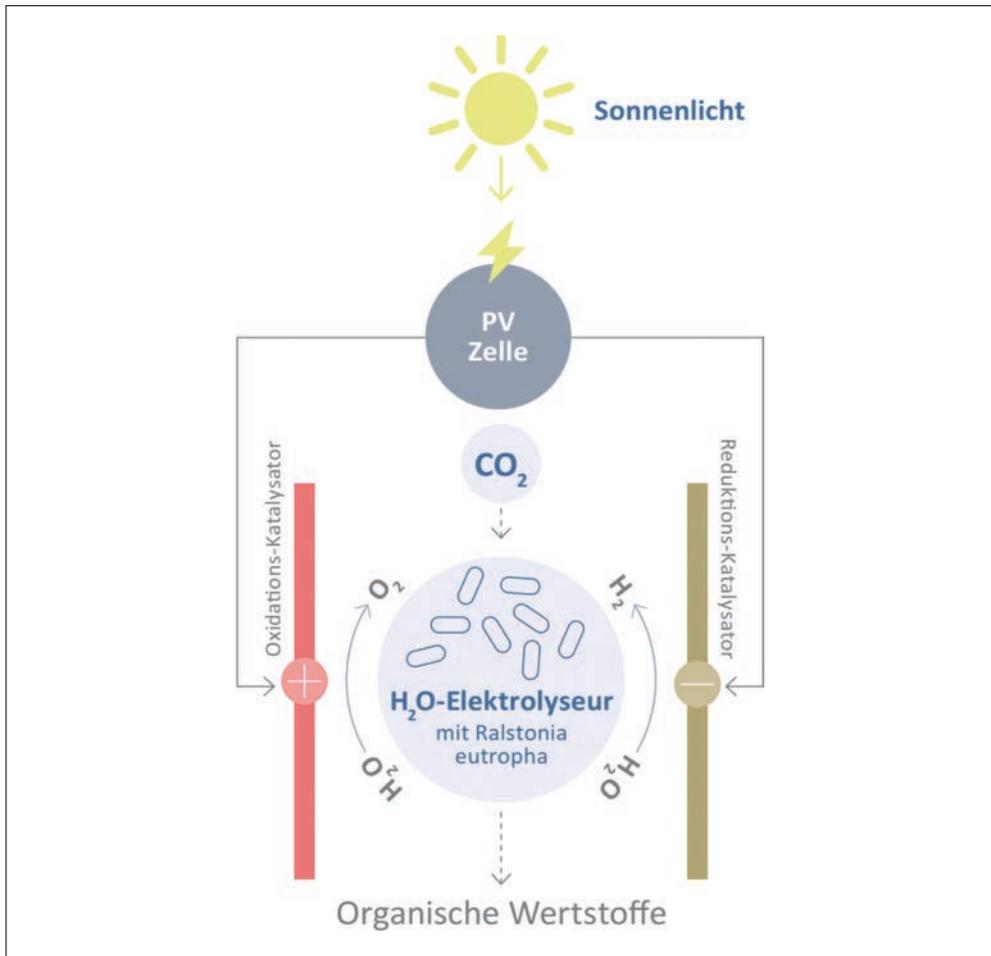


Abb. 6 Das „Nocera-Blatt“. In diesem hybriden System findet photovoltaisch-getriebene Elektrolyse von Wasser zu H₂ und O₂ statt, die anschließend im selben Reaktionsgefäß von dem Knallgasbakterium *Ralstonia eutropha* für die Reduktion von CO₂ in Wertstoffe wie Isopropanol genutzt werden. Das Knallgasbakterium ist in der Lage, mit H₂ und O₂ als einziger Energiequelle und CO₂ als einziger Kohlenstoffquelle zu wachsen. Gentechnisch können Bakterienstämme konstruiert werden, die in diesem Prozess gezielt organische Wertstoffe wie Isopropanol oder auch das Bioplastik Polyhydroxybutyrat produzieren. Das Knallgasbakterium ist robust gegenüber den Elektrokatalysatoren aus Cobaltdioxidphosphaten („CoPi“) und toleriert hohe Konzentrationen reaktiver Sauerstoffspezies. Im Labormaßstab wurden mit atmosphärischem CO₂ (0,04%) organische Verbindungen mit einer Sonnenlichtumwandlungseffizienz von fast 10% produziert über einen konstanten Zeitraum von fünf Tagen. (Abb. nach LIU et al. 2016.)

nicht möglich wären. In der tatsächlichen Umsetzung wird vor allem die elektrochemische Spaltung von Wasser bzw. die Reduktion von CO_2 betrieben, während die Umwandlung des Kohlenstoffs mit Hilfe von Mikroorganismen erfolgt.

Ein Beispiel für einen hybriden Prozess ist das „Nocera-Blatt“ (Abb. 6), bei dem photovoltaik-getriebene Wasserspaltung mit der mikrobiologischen Reduktion von CO_2 kombiniert wird (LIU et al. 2016). Am stromgetriebenen Katalysator entstehen Wasserstoff und Sauerstoff, die Energie für die CO_2 -Fixierung durch das Knallgasbakterium *Ralstonia eutropha* liefern. Um die Effizienz des integrierten Systems zu erhöhen, wurde in

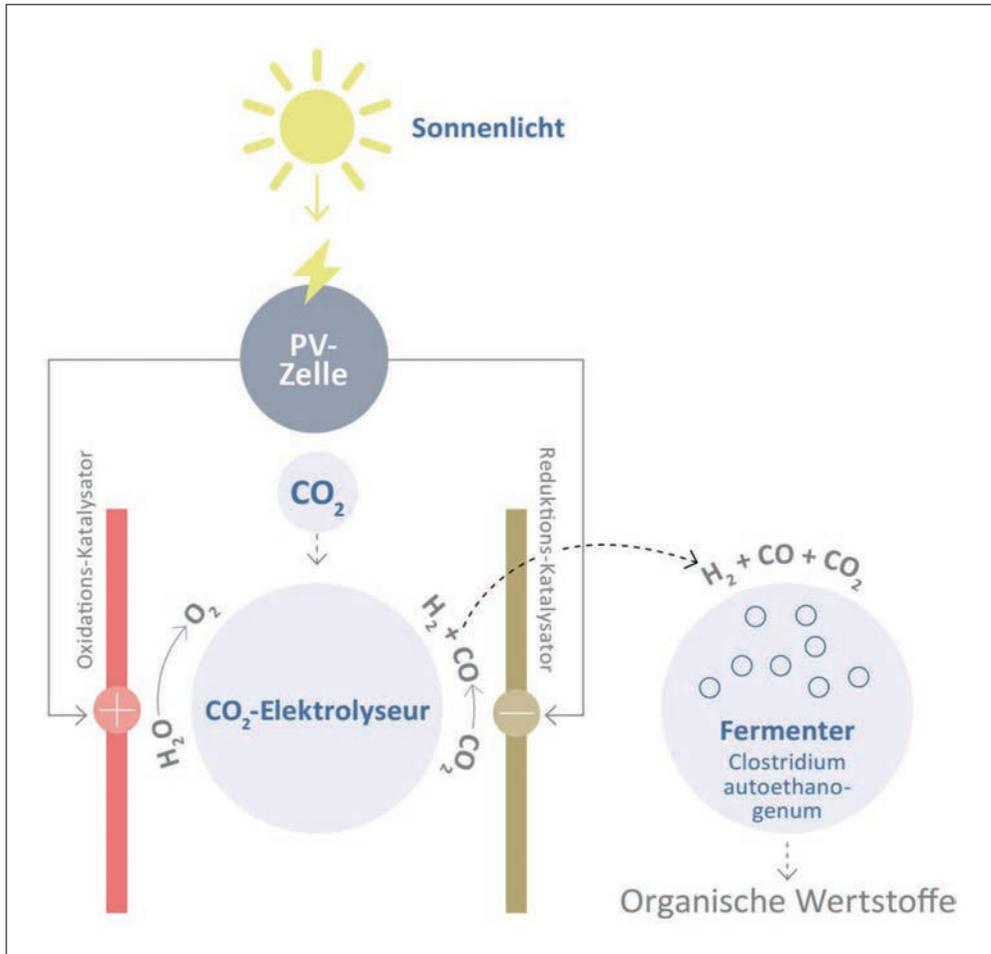


Abb. 7 „Rheticus-Projekt“. Ein hybrides System, das aus einem photovoltaisch-getriebenen CO_2 -Elektrolyseur besteht, der mit einer silberbasierten Gasdiffusionskathode ausgestattet ist und bei einer Elektrolyse-spannung von 3,5 V mit einer Stromdichte von 300 mA cm^{-2} aktiv ist. Die Ausbeute an CO beträgt 80%, die übrigen 20% der Elektronen fließen in die Reduktion von Protonen zu H_2 . Bei höheren Spannungen nimmt der H_2 -Anteil zu und die energetische Umwandlungseffizienz ab. Die in diesem CO_2 -Elektrolyseur gebildeten Gase CO und H_2 werden zusammen mit nicht umgesetztem CO_2 in einen separaten Fermenter geleitet. Die sogenannte Syngas-Mischung wird durch das Bakterium *Clostridium autoethanogenum* zu Essigsäure und Ethanol mit einer Effizienz von fast 100% umgewandelt. (Abb. nach HAAS et al. 2018.)

mehreren Schritten die Zusammensetzung der eingesetzten Katalysatormaterialien und des Mediums optimiert, um Überspannungen bei der Wasserspaltung zu reduzieren und die Toxizität auf das Bakterium zu minimieren. Durch metabolisches *Engineering* von *Ralstonia eutropha* konnte das fixierte CO₂ in die Produktion von Isopropanol bzw. Polyhydroxybutyrat umgeleitet werden. Die Demonstrationsanlage im Milliliter-Maßstab zeigt eine Lichtumwandlungseffizienz von 10%, was die Effizienz photosynthetischer Organismen übertrifft. Die nächste Herausforderung des Systems ist die Skalierung, vor allem die Steigerung der Elektrolyse-Stromdichte (1 mA) um einen Faktor 100 zur industriellen Nutzung.

Das in Deutschland entstandene „Rheticus-Projekt“ (Abb. 7) stellt ein weiteres Beispiel für ein hybrides System dar (HAAS et al. 2018). Bei diesem Prozess wird eine stromgetriebene Wasserstoff/CO₂-Elektrolyse betrieben, bei der Kohlenmonoxid und Wasserstoff entstehen. Das Gasgemisch („Syngas“) wird dann von einer Gemeinschaft acetogener Mikroorganismen zu Acetat und Ethanol und im Weiteren zu Butanol und Hexanol umgesetzt. Das System hat das Prototypenstadium erfolgreich durchlaufen und soll im nächsten Schritt auf den 20000-Tonnen-Maßstab skaliert werden.

Neben Wasserstoff- und Syngas-Elektrolyse sind weitere Ansätze in der Entwicklungsphase, die sich mit der Reduktion von CO₂ in C1-Verbindungen, wie Formiat (Ameisensäure) oder Methanol, beschäftigen. An die elektrochemische Umwandlung schließt sich eine mikrobielle Veredlung der C1-Verbindungen durch formato- bzw. methylotrophe Mikroorganismen an. Die verwendeten Mikroorganismen, z.B. *Methylobacterium extorquens* oder *Pichia pastoris*, sind entweder natürlich formato- bzw. methylotroph und werden durch metabolisches *Engineering* zur Produktion von Wertstoffen optimiert (OCHSNER et al. 2015), alternativ wird versucht, mittels synthetisch-biologischer Ansätze die Eigenschaft zur Methanol- bzw. Ameisensäureverwertung in bereits existierende Produktionsstämme, wie z.B. *Escherichia coli*, einzubringen (BANG und LEE 2018).

Die Vielfalt der verfolgten Ansätze zeichnet ein Bild eines hochdynamischen Forschungsfelds, in dem verschiedene hybride Systeme entstehen, die zukünftig eine wichtige Rolle im Übergang zu einer nachhaltigen Produktionslandschaft spielen, bei der CO₂ als Rohstoffquelle gewonnen werden kann.

10. Fazit

Mithilfe von metabolischem *Engineering* und der Synthetischen Biologie können heute bereits neue Stoffwechselnetzwerke zur Umwandlung von CO₂ realisiert werden, die die CO₂-Fixierungsprozesse der natürlichen Photosynthese in ihrer Effizienz übertreffen. Diese vielversprechenden ersten Erfolge bilden die Ausgangslage für die Implementierung in photosynthetische Organismen oder die Entwicklung künstlicher Zellen, die zur Photosynthese befähigt sind. Dadurch sollen in Zukunft modifizierte photosynthetische Organismen und hybride Photosynthese-Systeme erzeugt werden, die einen höheren Wirkungsgrad aufweisen oder mit deren Hilfe gezielt größere Mengen Brenn- und Wertstoffe (Wasserstoff, andere Biokraftstoffe, Feinchemikalien usw.) zur direkten Verwertung gewonnen werden können. Während viele der hier vorgestellten Ansätze sich noch in der Demonstrationsphase befinden, wird es absolut zwingend sein, bereits jetzt die gesellschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen für zukünftige Anwendungen zu schaffen.

Literatur

- acatech* (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Künstliche Intelligenz. Forschungsstand, wissenschaftlich-technische Herausforderungen und Perspektiven. München 2018
- BANG, J., and LEE, S. Y.: Assimilation of formic acid and CO₂ by engineered *Escherichia coli* equipped with reconstructed one-carbon assimilation pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* *115*, E9271–E9279 (2018)
- BAR-EVEN, A., NOOR, E., LEWIS, N. E., and MILO, R.: Design and analysis of synthetic carbon fixation pathways. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* *107*, 8889–8894 (2010)
- BAR-EVEN, A., NOOR, E., SAVIR, Y., LIEBERMEISTER, W., DAVIDI, D., TAWFIK, D. S., and MILO, R.: The moderately efficient enzyme: evolutionary and physicochemical trends shaping enzyme parameters. *Biochemistry* *50*, 4402–4410 (2011)
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), *acatech* (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften), Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.): Synthetische Biologie – Stellungnahme. Weinheim 2009
- ERB, T. J., BRECHT, V., MÜLLER, M., FUCHS, G., and ALBER, B. E.: Crotonyl-CoA carboxylase/reductase, a carboxylating enoyl-CoA thioester reductase. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* *104*, 10631–10636 (2009)
- ERB, T. J., JONES, P. R., and BAR-EVEN, A.: Synthetic metabolism: metabolic engineering meets enzyme design. *Current Opinion in Chemical Biology* *37*, 56–62 (2017)
- ERB, T. J., and ZARZYCKI, J.: Biochemical and synthetic biology approaches to improve photosynthetic CO₂-fixation. *Current Opinion in Chemical Biology* *34*, 72–79 (2016)
- HAAS, T., KRAUSE, R., WEBER, R., DEMLER, M., and SCHMID, G.: Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis* *1*, 32–39 (2018)
- LIU, C., COLÓN, B., ZIESACK, M., SILVER, P., and NOCERA, D.: Water splitting-biosynthetic system with CO₂ reduction efficiencies exceeding photosynthesis. *Science* *352*, 1210–1213 (2016)
- LONG, S. P., MARSHALL-COLON, A., and ZHU, X. G.: Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell* *161*, 56–66 (2015)
- OCHSNER, A. M., SONNTAG, F., BUCHHAUPT, M., SCHRADER, J., and VORHOLT, J. A.: *Methylobacterium extorquens*: methylotrophy and biotechnological applications. *Applied Microbiology and Biotechnology* *99*, 517–534 (2015)
- OLIVER, J. W., MACHADO, I. M., YONEDA, H., and ATSUMI, S.: Cyanobacterial conversion of carbon dioxide to 2,3-butanediol. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* *110*, 1249–1254 (2013)
- OLIVER, N. J., RABINOVITCH-DEERE, C. A., CAROLL, A. L., NOZZI, N. E., CASE, A. E., and ATSUMI, S.: Cyanobacterial metabolic engineering for biofuel and chemical production. *Current Opinion in Chemical Biology* *35*, 45–50 (2016)
- SCHWANDER, T., SCHADA VON BORZYSKOWSKI, L., BURGENDER, S., CORTINA, N. S., and ERB, T. J.: A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science* *354*, 901–904 (2016)
- SCHWILLE, P., SPATZ, J., LANDFESTER, K., BODENSCHATZ, E., HERMINGHAUS, S., SOURJIK, V., ERB, T., BASTIAENS, P., LIBOWSKY, R., HYMAN, A., DABROCK, P., BARET, J. C., VIDAKOVIC-KOCH, T., BIELING, P., DIMOVA, R., MUTSCHLER, H., ROBINSON, T., TANG, D., WEGNER, S., and SUNDMACHER, K.: MaxSynBio – Avenues towards creating cells from the bottom up. *Angewandte Chemie International Edition in English* *57*, 13382–13392 (2018)
- WALKER, B. J., VANLOOCKE, A., BERNACCHI, C. J., and ORT, D. R.: The costs of photorespiration to food production now and in the future. *Annual Review of Plant Biology* *67*, 107–129 (2016)

Prof. Dr. Tobias J. ERB
Max-Planck-Institut für terrestrische Mikrobiologie
Abteilung Biochemie und Synthetischer Metabolismus
Karl-von-Frisch-Straße 10
35043 Marburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 6421 178700
Fax: +49 6421 178809
E-Mail: toerb@mpi-marburg.de

Künstliche Photosynthese – Status und Perspektiven

Jan-Niclas BELLER und Matthias BELLER¹ ML (Berlin)



¹ Den Vortrag zur Jahresversammlung hielt Matthias BELLER.

Zusammenfassung

Die künstliche Photosynthese beschreibt Technologien, mittels derer chemische Energieträger und Wertstoffe unter Verwendung von Sonnenlicht als Energiequelle hergestellt werden. Dabei wird ein zentrales Prinzip des biologischen Prozesses nachgeahmt: die Kopplung von lichtinduzierter Ladungstrennung mit katalytischen Prozessen für die Produktion energiereicherer Verbindungen, das idealerweise direkt in integrierten Anlagen abläuft. In dieser kurzen Übersicht wird basierend auf den Grundkonzepten der biologischen Photosynthese eine Einführung in die Funktionsweise der künstlichen Photosynthese gegeben. Unterschiede zwischen künstlicher, hybrider und natürlicher Photosynthese werden kurz beschrieben und die möglichen Vor- und Nachteile der jeweiligen Technologien werden aufgezeigt.

Abstract

Artificial photosynthesis describes technologies by means of which chemical energy carriers and other valuable products are produced using sunlight as an energy source. A central principle of the biological process is imitated: the coupling of light-induced charge separation with catalytic processes for the production of energy-rich compounds, which ideally takes place directly in integrated facilities. This short overview gives an introduction to the function of artificial photosynthesis based on the basic concepts of biological photosynthesis. Differences between artificial, hybrid and natural photosynthesis are briefly described and the possible advantages and disadvantages of the respective technologies are pointed out.

1. Einführung

Weltweit ist der Energieverbrauch der Menschheit seit Anfang der 1970er Jahre bis 2019 um fast 100% gestiegen. Trotz vielfältiger politischer Maßnahmen gibt es derzeit keine Anzeichen, dass dieser Trend gebremst wird, sondern er verstärkt sich sogar noch. Daher rechnet man mit einer weiteren Verdopplung der Energienutzung in den nächsten 30 Jahren (IRENA 2019). Aktuell dominieren immer noch fossile Rohstoffe – im Wesentlichen Kohle, Gas und Öl – in der globalen Energieerzeugung, die damit auch den entscheidenden Faktor für den Klimawandel darstellen (Abb. 1). Trotz des verstärkten Ausbaus erneuerbarer Energien, kann der wachsende weltweite Energiehunger nachhaltig nur durch die Entwicklung verbesserter CO₂-neutraler Technologien gestillt werden. Dafür sind grundlagenorientierte und angewandte Forschung in den Natur-, Lebens- und Ingenieurwissenschaften von zentraler Bedeutung.

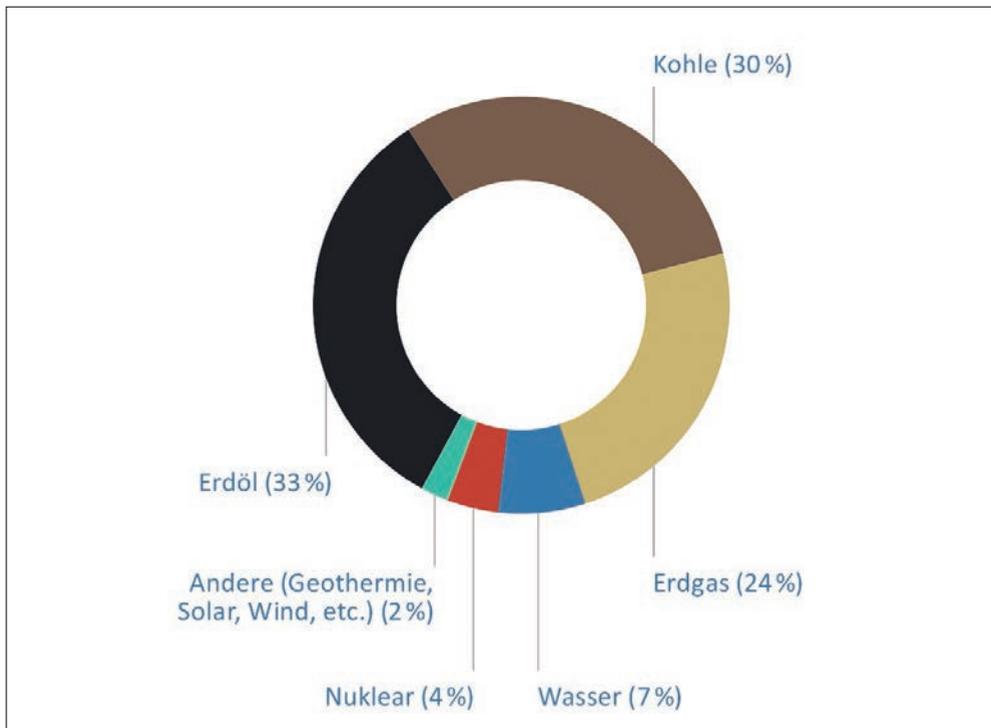


Abb. 1 Globale Versorgung mit kommerziell gehandelten Energieträgern für das Jahr 2016 (acatech et al. 2018, S. 9).²

Um die Herausforderungen des Klimawandels zu meistern, lohnt sich ein Blick zurück in die Vergangenheit. Der Hauptteil der heute verwendeten fossilen Ressourcen entstand zu-

² Zum Thema siehe auch BP: Statistical Review of World Energy, 2017; URL: <http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energyeconomics/statisticalreview2017/bpstatistical-reviewofworldenergy2017fullreport.pdf>.

nächst durch biologische Photosynthese und nachfolgende geologische Umwandlungsprozesse. Auch heute werden durch Photosynthese jedes Jahr mehr als 170 Milliarden Tonnen Biomasse produziert (PETERS 2006). In diesem komplexen biologischen Prozess ermöglicht Energie in Form von Licht die endotherme Transformation von CO_2 zu organischen Produkten wie Kohlenhydraten, Fetten usw. Die Energieeffizienz der natürlichen Photosynthese ist trotz der Millionen Jahre dauernden Entwicklung vergleichsweise schlecht. Künstliche Photosynthesetechnologien versuchen, an diesem Punkt anzusetzen, und zielen in erster Linie darauf, diese Effizienz zu verbessern, womit sie für ein nachhaltiges Energiesystem ein zentraler Baustein werden könnten. Beispielhaft soll hier nur erwähnt werden, dass die Umwandlung von nur 0,1% der Energie der Sonneneinstrahlung auf die Erde mit einem Wirkungsgrad von 10% dem Vierfachen des jährlichen Primärenergiebedarfs entspricht.³

Um das Potential und den Stand der Technik auf dem Gebiet der künstlichen Photosynthese zu ermitteln, beauftragten die Deutsche Akademie der Wissenschaften Leopoldina, die Deutsche Akademie für Technikwissenschaften acatech und die Union der Akademien der Wissenschaften ein Expertengremium mit der Erstellung eines Positionspapiers (acatech et al. 2018). In diesem Artikel werden wir über die Ergebnisse dieser Studie berichten sowie kurz die Unterschiede zwischen künstlicher, hybrider und natürlicher Photosynthese vorstellen.

Um die künstliche Photosynthese besser zu verstehen, werfen wir zuerst einmal einen Blick auf die biologische Photosynthese. Hier findet der Gesamtprozess in mehreren Schritten statt, die räumlich und zeitlich voneinander getrennt sind. In der sogenannten Lichtreaktion wird Sonnenlicht genutzt, um Wasser zu spalten. Bei dieser Spaltung werden primär Protonen und Elektronen freigesetzt, wodurch dann NADPH^+ zu Nikotinsäureamid-Dinukleotidphosphat (NADPH) reduziert wird. Dieses biochemische Molekül wird danach in der Dunkelreaktion verwendet, um Kohlenstoffdioxid in weitere organische Bausteine und anschließend in alle Arten von Chemikalien umzuwandeln. Wichtig für diesen Prozess ist das Enzym Rubisco (Ribulose-1,5-Bisphosphatcarboxylase/-oxygenase), welches CO_2 im Calvin-Zyklus fixiert.

In der biologischen Photosynthese liegt die maximale theoretische Effizienz für die Umwandlung von Lichtenergie zu chemischer Energie bei etwa 10%. Jedoch werden realistisch von den meisten Pflanzen weniger als < 1% im Jahresdurchschnitt genutzt.⁴ Dieser geringe Wirkungsgrad ist u. a. durch Streuung und Reflexion von grünem, ultraviolettem und infrarotem Licht zu erklären. Deshalb ist es etwas überraschend, dass viele Pflanzenarten, trotz ihres relativ niedrigen Wirkungsgrades, zur energetischen Nutzung angebaut werden. Aus diesen „energiereichen“ Nutzpflanzen werden wiederum mit einem relativ niedrigen Wirkungsgrad Biokraftstoffe oder Strom gewonnen. Im Fall des häufig verwendeten „Silomais“, der für die Herstellung von Biogas genutzt wird, beträgt der Elektroenergie-Jahresertrag pro Quadratmeter nur 1,5 bis 2,2 kWh. Hingegen können mit herkömmlichen Solarzellen bis zu 100 kWh pro Jahr erzeugt werden.⁵ Eine Verstromung von Biomasse ist daher kritisch zu hinterfragen, und bei Biokraftstoffen sollte man für eine sinnvollere energetische Nutzung in Zukunft auf effizientere Pflanzen wie z. B. chinesisches Schilf zurückgreifen.

3 https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/10/WER_2013_8_Solar_revised.pdf.

4 Ebenda.

5 <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>. Faustzahlen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. für Biogas, abgerufen am 8. Juli 2019.

2. Modifizierte biologische Photosynthese

In der modifizierten biologischen Photosynthese werden unter Verwendung genetisch veränderter Organismen chemische Wertstoffe hergestellt (KRUSE et al. 2005). Das Prinzip ähnelt der traditionellen Erzeugung von Biokraftstoffen oder Biogas mit dem entscheidenden Unterschied, dass hier durch gezielte molekulare Modifikationen z. B. mittels Gentechnik eine verbesserte Effizienz erreicht wird. Die präzisen Modifikationen an photosynthetischen Mikroorganismen sollen nicht nur die natürlichen biologischen Prozesse verbessern und beschleunigen, sondern insbesondere auch die Lichtabsorption der Mikroorganismen verbessern. Außerdem wird auch die Einführung komplett neuer Stoffwechselwege in Betracht gezogen. Die Kopplung von artifiziellen mit biologischen Komponenten zu Hybridsystemen ist eine weitere vielversprechende Idee, die derzeit aktiv verfolgt wird, um energetische oder chemische Wertstoffe effizienter herzustellen. Forscher von Siemens und Evonik konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass die sequentielle Kopplung von Photovoltaik, Elektrolyse und Biotechnologie möglich ist. In einem Pilotprozess wird dabei Solarstrom verwendet, um Wasserstoff und/oder Kohlenmonoxid durch Elektrolyse aus Wasser und Kohlenstoffdioxid herzustellen. Aus diesen Rohstoffen produzieren anschließend Mikroorganismen Alkohole wie 1-Butanol und 1-Hexanol. Diesem Prinzip folgend soll im Jahr 2021 in Marl eine Pilotanlage in Betrieb genommen werden, um Ausgangsstoffe für spezielle Kunststoffe oder Nahrungsergänzungsmittel herzustellen. Im Erfolgsfall rechnet man mit einer Produktionskapazität von bis zu 20 000 Tonnen pro Jahr. Auch die Herstellung anderer Spezialchemikalien oder Kraftstoffe ist denkbar (HAAS et al. 2018).

3. Künstliche Photosynthese

Das kürzlich veröffentlichte *Whitepaper* von Leopoldina, acatech und der Akademienunion zeigt, wie vielfältig künstliche Photosynthesetechnologien in Bezug auf die Herstellung von chemischen Energieträgern und Wertstoffen sind (acatech et al. 2018). Zentral für all diese Reaktionen ist die Umwandlung von CO_2 zu chemischen Wertstoffen mittels Sonnenlicht als einziger Energiequelle. Die besondere Stärke dieses allgemeinen Ansatzes liegt in der Umwandlung von erneuerbarer Energie in chemische Speichermaterialien, die leicht gelagert und transportiert werden können. Heutzutage wird eine Reihe von Ansätzen unter dem Oberbegriff der künstlichen Photosynthese (Abb. 2) zusammengefasst (ZHRAN et al. 2019, ZHANGA und SUN 2018, REMIRO-BUENAMANANA und GARCIA 2019, WANG et al. 2018, FUKUZUMI et al. 2018). Die meisten von ihnen haben gemeinsam, dass Prozesse der Reduktion und/oder Protonenspende durch den Einsatz von externer (Licht-)Energie stattfinden. Eng mit dem Konzept der künstlichen Photosynthese verbunden sind die sogenannten „Power to X“-Technologien (EVELOY und GEBREEGZIABHER 2018). Auch hier wird erneuerbare Energie (in mehrstufigen Prozessen) zu Kraftstoffen und chemischen Produkten umgewandelt. Grundsätzlich könnten so die aktuellen Probleme von Energiespeicherung und Energietransport behoben werden. Energieüberschüsse aus Windkraft oder Photovoltaik würden für die Elektrolyse von Wasser genutzt. Der resultierende Wasserstoff kann anschließend zur katalytischen Hydrierung von Kohlendioxid (z. B. in Form von Abgasen aus konventionellen Kraftwerken oder der Stahlindustrie) genutzt werden, wobei

besser speicherbare Energievektoren wie Methan, Methanol oder synthetische Kraftstoffe gebildet werden. Die so hergestellten Substanzen sind vergleichsweise einfache energiereiche Moleküle und nicht komplexe Stoffe wie bei der natürlichen Photosynthese. Neben kohlenstoffhaltigen Produkten wird auch die Produktion von Ammoniak als Energieträger durch Reduktion von Luftstickstoff diskutiert (HIRAKAWA et al. 2017).

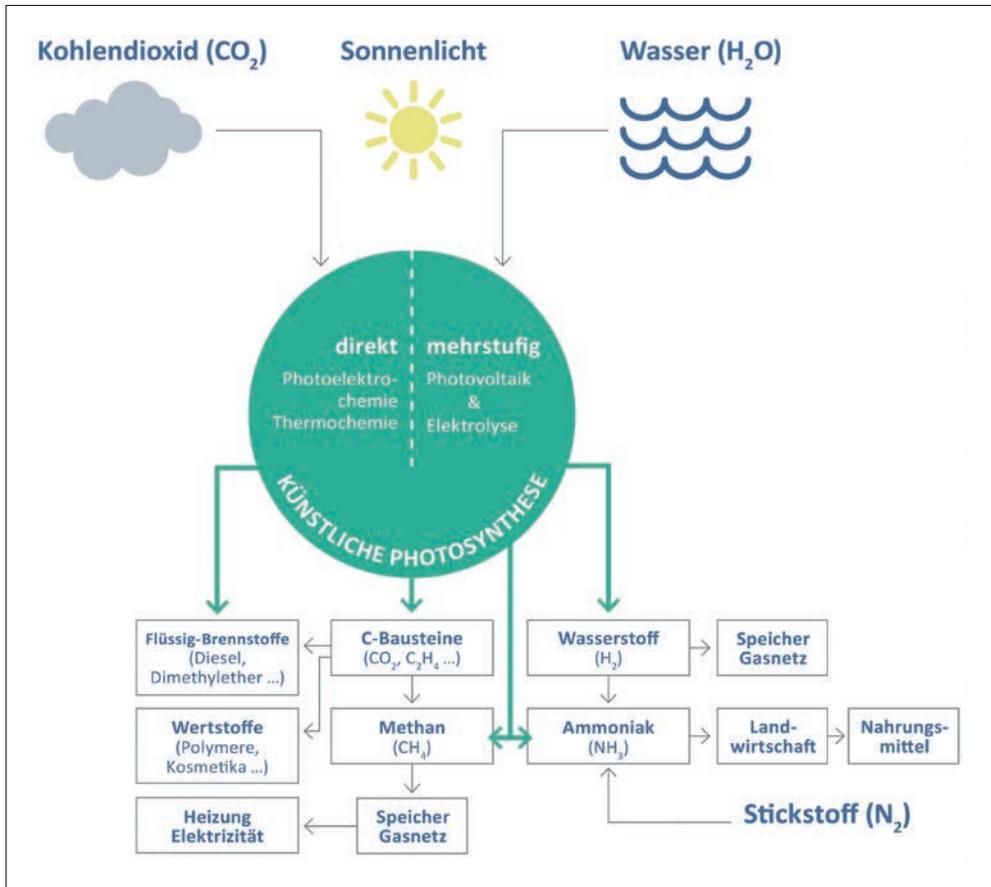


Abb. 2 Potential der künstlichen Photosynthese im globalen Energie- und Rohstoffsystem

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die meisten dieser Konzepte technologisch bereits relativ gut etabliert sind und eine kurz- und mittelfristige Umsetzung möglich scheint, wenn die ökonomischen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Im Gegensatz zu künstlicher Photosynthese fokussieren sich die „Power to X“-Technologien auf eine sequentielle Nutzung der Teilprozesse anstelle eines integrierten Ansatzes.

Der Elektronentransfer bei künstlichen Photosyntheseprozessen besteht aus zwei miteinander gekoppelten Prozessen (Halbreaktionen): (a) der Oxidation von Wassermolekülen zu Elektronen und Protonen und (b) der Reduktion von Kohlendioxid (oder Stickstoff) mittels Protonen und Elektronen (Abb. 3). Die für diese Prozesse notwendige Ener-

gie wird in Form von Licht zur Verfügung gestellt. Zur Lichtabsorption können natürlich vorkommende lichtabsorbierende Pigmente oder auch künstliche „high-chem“-Materialien, wie sie typischerweise in Photovoltaikanlagen eingesetzt werden, verwendet werden. Der große Vorteil der anorganischen Photovoltaikanlagen (z. B. auf Basis von Silizium oder Halbleitern) besteht vor allem darin, dass sie stabiler und wartungsarm sind. Der momentane Stand der Technik auf diesem Gebiet lässt einen maximalen Wirkungsgrad von 33 % zu, welcher realistisch außerhalb des Labors jedoch nicht erreicht wird.

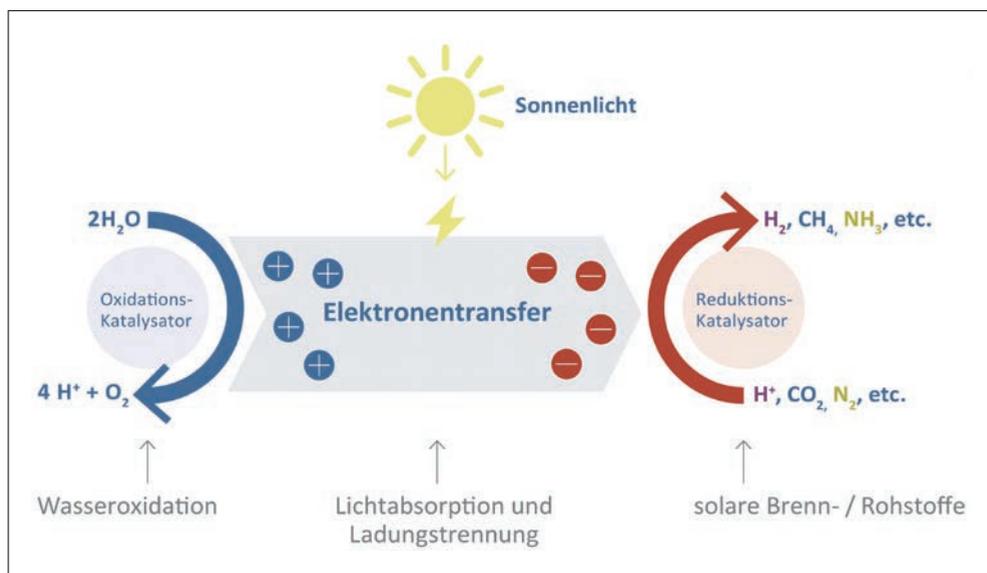


Abb. 3 Teilprozesse der künstlichen Photosynthese im Überblick (acatech et al. 2018, S. 15)

In den letzten Jahren wurde in der Grundlagenforschung die Anbindung von lichtabsorbierenden Materialien an sogenannte Antennensysteme untersucht, um effizientere integrierte Systeme zu entwickeln. Sowohl für die Wasseroxidation als auch die folgenden Reduktionsreaktionen werden Katalysatoren benötigt, die die Kinetik der Prozesse beeinflussen. Aufgrund ihrer Verfügbarkeit und dem damit einhergehenden niedrigerem Preis sind (Molekular-)Katalysatoren basierend auf 3d-Metallen von besonderem aktuellem Interesse.⁶ Die Fixierung der Katalysatoren findet auf geeigneten Flächen wie Kohlenstoff, Quantenpunkten, Metallen, Oxidoberflächen oder Halbleitern statt (SOKOL et al. 2018, KREFT et al. 2019). Im Bereich der integrierten Systeme erregte die Entwicklung der sogenannten „künstlichen Blätter“ große Aufmerksamkeit. Dieses Konzept wurde besonders von der Forschungsgruppe um NOCERA propagiert. In den Originalarbeiten verwendete man Kobalt und Nickel als Katalysatoren für die Wasserspaltung analog zum PS II (NOCERA 2012). Trotz signifikanter Fortschritte sind solche Systeme bisher kommerziell noch nicht wettbewerbsfähig. Alternative Entwicklungen wie die von LEWIS und Mitarbeitern verwenden membrangetrennte Photoanoden (zur Wasseroxidation) und Photokathoden (zur Wasser-

6 Für eine ausgezeichnete Übersicht siehe DALLE et al. 2019 und STEINLECHNER et al. 2019.

stofferzeugung aus Protonen) (VERLAGE et al. 2015), wobei auch hier für reale Anwendungen noch große Herausforderungen bewältigt werden müssen, vor allem bei der Stabilität und den Kosten der meist Platin enthaltenden Katalysatoren.

4. Ausblick und Herausforderungen der Zukunft

Im Gegensatz zur natürlichen Photosynthese wird bei künstlichen Photosynthesetechnologien die Lichtenergie direkt oder sequentiell mit Katalysatoren zur Synthese von einfachen chemischen Kraft- und Wertstoffen verwendet. Weltweit wurden in den letzten Jahren signifikante Fortschritte auf diesem Gebiet erzielt. Dennoch gibt es zentrale Herausforderungen, die bewältigt werden müssen, um technische und wirtschaftliche Umsetzungen zu realisieren.

Wie eingangs diskutiert, ist die Effizienz bei der Umwandlung der Energie des sichtbaren Sonnenlichts bei natürlicher Photosynthese vergleichsweise gering. Die meisten Pflanzen nutzen nur unter 1% des eigentlichen Potentials. Die schon heute verfügbaren Technologien auf dem Gebiet der künstlichen Photosynthese und „Power to X“-Technologien ermöglichen es, deutlich höhere Wirkungsgrade zu erzielen. Allein durch die Kombination von handelsüblichen Solarzellen und Elektrolyseuren kann aktuell Wasserstoff mit einem Gesamtwirkungsgrad von ca. 10% hergestellt werden. Der so produzierte „grüne“ Wasserstoff ist allerdings noch 2–5-mal teurer als Wasserstoff, der aktuell durch Reformierung fossiler Ressourcen wie Methan und niedriger Alkane produziert wird. Um die Technologien preislich kompetitiver zu machen, ist die Herstellung von kostengünstigen und langzeitstabilen Photokatalysatoren ein gewichtiger Aspekt. Weiterhin kann die im Moment stark diskutierte CO₂-Steuer schnell zu einer anderen ökonomischen Bewertung der Prozesse führen. Neben den rein ökonomischen Betrachtungen muss auch berücksichtigt werden, dass Wasserstoff als Energieträger einige Nachteile im Handling gegenüber herkömmlichen Kraftstoffen hat.

Auf der anderen Seite stehen die Vorteile einer zirkularen Energiewirtschaft und die Chancen, die sich durch die Verwendung von kleineren und dezentralen Anlagen ergeben. In der langfristigen Nutzung (>2030), können sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für integrierte Geräte ergeben, die direkt Kohlenstoffdioxid und regenerative Energie zu Wertstoffen umsetzen. Eine kritische Herausforderung ist dafür die effiziente Abtrennung/Nutzung von Kohlendioxid aus der Luft, das jedoch nur zu 0,04% in der Atmosphäre enthalten ist. Bei erfolgreicher Lösung dieser Probleme kann die künstliche Photosynthese schon in den nächsten Jahren einen entscheidenden Beitrag zur Klimaneutralität leisten.

Dank

Wir bedanken uns für die Unterstützung des Europäischen Forschungsrates (ERC), des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) sowie des Landes Mecklenburg-Vorpommern für die finanzielle und allgemeine Unterstützung.

Literatur

- acatech – National Academy of Science and Engineering, German National Academy of Sciences Leopoldina and Union of the German Academies of Sciences and Humanities* (Eds.): Artificial Photosynthesis. München 2018
- DALLE, K. E., WARNAN, J., LEUNG, J. J., REUILLARD, B., KARMEL, I. S., and REISNER, E.: Electro- and solar-driven fuel synthesis with first row transition metal complexes. *Chemical Reviews* 119/4, 2752–2875 (2019)
- EVELOY, V., and GEBREEGZIABHER, T.: A review of projected power-to-gas deployment scenarios. *Energies* 11, 1824 (2018), doi:10.3390/en11071824
- FUKUZUMI, S., LEE, Y.-M., and NAM, W.: Mimicry and functions of photosynthetic reaction centers. *Biochemical Society Transactions* 46/5, 1279–1288 (2018)
- HAAS, T., KRAUSE, R., WEBER, R., DEMLER, M., and SCHMID, G.: Technical photosynthesis involving CO₂ electrolysis and fermentation. *Nature Catalysis* 1, 32–39 (2018)
- HIRAKAWA, H., HASHIMOTO, M., SHIRAISHI, Y., and HIRAI, T.: Photocatalytic conversion of nitrogen to ammonia with water on surface oxygen vacancies of titanium dioxide. *Journal of the American Chemical Society* 139/31, 10929–10936 (2017)
- IRENA: Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency 2019
- KREFT, S., SCHOCH, R., SCHNEIDEWIND, J., RABEAH, J., KONDRATENKO, E. V., KONDRATENKO, V. A., JUNGE, H., BAUER, M., WOHLRAB, S., and BELLER, M.: Improving selectivity and activity of CO₂ reduction photocatalysts with oxygen. *Chem* 5/7, 1818–1833 (2019), doi:10.1016/j.chempr.2019.04.006
- KRUSE, O., RUPPRECHT, J., MUSSGUG, J. H., DISMUKESC, G. C., and HANKAMER, B.: Photosynthesis: a blueprint for solar energy capture and biohydrogen production technologies. *Photochemical & Photobiological Science* 4/12, 957–970 (2005)
- NOCERA, D. G.: The artificial leaf. *Accounts of Chemical Research* 45/5, 767–776 (2012)
- PETERS, D.: Kohlenhydrate als Fermentationsrohstoff. *Chemie Ingenieur Technik* 78, 229–238 (2006)
- REMIRO-BUENAMANANA, S., and GARCIA, H.: Photoassisted CO₂ conversion to fuels. *ChemCatChem* 11, 342–356 (2019)
- SOKOL, K. P., ROBINSON, W. E., WARNAN, J., KORNIENKO, N., NOWACZYK, M. M., RUFF, A., ZHANG, J. Z., and REISNER, E.: Bias-free photoelectrochemical water splitting with photosystem II on a dye-sensitized photoanode wired to hydrogenase. *Nature Energy* 3/11, 944–951 (2018)
- STEINLECHNER, C., ROESEL, A. F., OBEREM, E., PÄPCKE, A., ROCKSTROH, N., GLOAGUEN, F., LOCHBRUNNER, S., LUDWIG, R., SPANNENBERG, A., JUNGE, H., FRANCKE, R., and BELLER, M.: Selective earth-abundant system for CO₂ reduction: Comparing photo- and electrocatalytic processes. *ACS Catalysis* 9, 2091–2100 (2019)
- VERLAGE, E., HU, S., LIU, R., JONES, R. J. R., SUN, K., XIANG, C., LEWIS, N. S., and ATWATER, H. A.: A monolithically integrated, intrinsically safe, 10% efficient, solar-driven water-splitting system based on active, stable earth-abundant electrocatalysts in conjunction with tandem III–V light absorbers protected by amorphous TiO₂ films. *Energy & Environmental Science* 8, 3166–3172 (2015)
- WANG, J.-W., ZHONG, D.-C., and LU, T.-B.: Artificial photosynthesis: Catalytic water oxidation and CO₂ reduction by dinuclear non-noble-metal molecular catalysts. *Coordination Chemistry Reviews* 377, 225–236 (2018)
- ZAHRAN, Z. N., TSUBONOUCHI, Y., MOHAMED, E. A., and YAGI, M.: Recent advances in the development of molecular catalyst-based anodes for water oxidation toward artificial photosynthesis. *ChemSusChem* 12, 1775–1793 (2019)
- ZHANG, B., and SUN, L.: Artificial photosynthesis: opportunities and challenges of molecular catalysts. *Chemical Society Reviews* 48, 2216–2264 (2018)

Prof. Dr. Matthias BELLER
 Leibniz-Institut für Katalyse e. V.
 an der Universität Rostock
 Albert-Einstein Straße 29a
 18059 Rostock
 Bundesrepublik Deutschland
 Tel.: +49 381 1281113
 Fax: +49 381 12815000
 E-Mail: matthias.beller@catalysis.de

Dimensionen der antimikrobiellen Resistenz

Julia HAHN und Katja BECKER¹ ML (Gießen)



¹ Den Vortrag zur Jahresversammlung hielt Katja BECKER.

Zusammenfassung

Infektionskrankheiten stellen weltweit noch immer eine große Bedrohung für Gesundheit und Wohlstand der Menschheit dar. Gerade bakterielle Infektionen lassen sich immer schwieriger behandeln, da nicht nur die Antibiotikaentwicklung seit mehr als 40 Jahren weitgehend stagniert, sondern auch die Zahl der resistenten Erreger stark zunimmt. Um dieses globale Problem zu lösen oder zumindest zu mindern, müssen Wissenschaft, Politik, Gesellschaft und Wirtschaft national und international gemeinsam agieren. Die G7-Akademien schlugen hierfür bereits im Jahr 2015 zentrale Maßnahmen vor: (1.) Eine beschleunigte Forschung und Produktion von neuen antimikrobiellen Wirkstoffen, Impfstoffen und Diagnostiktools; (2.) Schwerpunktsetzungen der Forschungsagenda, um Wissenslücken wichtiger Krankheiten zu schließen; (3.) die Einrichtung globaler Überwachungsprogramme; (4.) die Erhöhung des Bewusstseins für antimikrobielle Resistenz in der Gesellschaft und (5.) koordinierte, schnelle Antworten auf große Epidemien. Auch die G20-Akademien der Wissenschaften schlagen verschiedene Strategien vor, die besonders die Gesundheitssysteme der verschiedenen Länder, die Lebensstile und den Informationsaustausch adressieren. Obwohl in den letzten Jahren einige vielversprechende Entwicklungen zu verzeichnen sind, wie der *One-Health*-Ansatz in der Deutschen Antibiotika-Resistenz-Strategie (DART) oder die weitere Etablierung von Forschungsstrukturen, steht die Lösung des Antibiotikaproblems noch vor einem langen Weg. Der Artikel „Dimensionen der antimikrobiellen Resistenz“ – angelehnt an den gleichnamigen Vortrag auf der Leopoldina-Jahresversammlung 2018 – gibt einen Überblick über die Problematik der Antibiotikaresistenz in verschiedenen Dimensionen – von Begrifflichkeiten und Resistenzen bei verschiedenen Erregern über die zeitliche Entwicklung und Manifestationen, bis hin zu geographischer Verbreitung und Lösungsansätzen.

Abstract

Infectious diseases still represent a major threat to human health and welfare worldwide. Particularly bacterial infections have become increasingly difficult to treat since not only has the development of antibiotics largely stagnated for more than 40 years, but also the number of resistant bacteria has been strongly increasing. In order to solve or at least reduce this global problem, science, politics, society, and the economy must act jointly on national and international levels. The G7 academies proposed in 2015 central measures: (1.) accelerated research and production of new antimicrobial agents, vaccines, and diagnostic tools; (2.) focusing research agendas to fill knowledge gaps on major diseases; (3.) the establishment of global surveillance systems; (4.) the enhancement of awareness for antimicrobial resistance in the society; and (5.) coordinated and rapid responses to major epidemics. The G20 academies of sciences also propose various strategies that address in particular the health systems of different countries, the lifestyles and the exchange of information. Although some promising developments have been denoted in recent years, such as the One-Health approach in the German Antibiotic Resistance Strategy (DART) or the further establishment of research structures, it will still be a long way to solve the antibiotic resistance problem. The article “Dimensions of Antimicrobial Resistance” – based on the corresponding presentation at the Leopoldina Annual Meeting 2018 – will give an overview of the problems of antibiotic resistance in various dimensions, from definitions and resistances in various pathogens, via chronological developments and manifestations, to geographic distribution and solution statements.

1. Erste Dimension – Der Resistenzbegriff

Resistenz hat zunächst nichts Gewalttätiges, sie ist vielmehr ein Zustand, eine Bereitschaft, die durch das Leben, durch den Kontakt mit dem Leben entsteht und in der Regel aufrechterhalten wird. Gleichzeitig ermöglicht dieser Zustand erst das Leben und die Begegnung mit Vielem, was uns umgibt. Resistenz verstärkt die Abwehr, die aktive Auseinandersetzung mit Widrigkeiten stärkt die Abwehr. Und die Resistenz lebt von der Hoffnung. In dem folgenden Artikel sollen sechs Dimensionen der antimikrobiellen Resistenz vorgestellt werden – von Begrifflichkeiten über Erreger und Mechanismen, von der zeitlichen Entwicklung über Manifestationen und geographische Verbreitung bis hin zu Lösungsansätzen.

Die Widerstandsfähigkeit des Menschen gegen schädliche Einflüsse, wie beispielsweise Infektionen, lässt sich in zwei Bereiche unterteilen: das angeborene Immunsystem und die Immunität. Das angeborene Immunsystem, das im engeren Sinne die Resistenz darstellt, besteht aus physikalischen Barrieren, wie der Haut, aus bestimmten Proteinemolekülen, wie z. B. Lysozym, Defensinen oder Komplementfaktoren, sowie aus spezialisierten Zellen, wie z. B. Makrophagen, neutrophilen Granulozyten und Natürlichen Killerzellen. Neben dieser angeborenen Resistenz gibt es die Immunität, die man im Laufe des Lebens gegen Krankheitserreger erwirbt. Komponenten dieses adaptiven Immunsystems sind spezifische Antikörper und wiederum Zellen, wie T- und B-Lymphozyten.

Wie sieht es aber mit der Resistenz von Mikroorganismen aus? Populationen von Mikroorganismen bestehen aus abertausenden von Individuen, von denen einige weniger anfällig sind als andere, z. B. gegen ein Antibiotikum (antimikrobielle Resistenz, AMR). Beim Einsatz eines Antibiotikums geschieht vielleicht zuerst einmal nicht viel. Das hängt vom Antibiotikum und der Dosierung ab. Bei längerer Anwendung sterben jedoch die empfindlichsten Individuen ab, die Resistenteren überleben. Das Sterben und Verarmen der Population geht immer weiter. Wird die Population weiterhin dem Selektionsdruck durch das Antibiotikum ausgesetzt, können Erreger entstehen, die vollständig resistent dagegen sind. Diese sind gerade bei anhaltendem oder sich wiederholendem Selektionsdruck klar im Vorteil und können die Population dominieren und nachhaltig verändern. Hierbei gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten der Selektion: Bei der *Targetselektion* können in pathogenen Organismen, wie den Erregern von Tuberkulose oder Typhus, direkt Mutationen auftreten, die zur Resistenz führen. Bei der *Kollateralselektion* werden Bakterien, die eigentlich harmlos sind und im Darm oder auf der Haut friedlich leben, durch die Behandlung anderer Infektionen resistent und können opportunistische Infektionen verursachen, die meist immungeschwächte Patienten betreffen und schwer zu behandeln sind. Hier kann man beispielsweise an Methicillin-Resistenz in *Staphylococcus aureus* oder die Carbapenem-Resistenz in *Klebsiella pneumoniae* denken.

Jährlich sterben etwa 700 000 Menschen an Infektionen mit resistenten Infektionserregern. Im Jahr 2050 werden es laut aktueller Prognosen 10 Millionen Menschen sein. Die Kosten für die globale Wirtschaftsleistung werden sich bis 2050 dabei prospektiv auf 100 Billionen USD pro Jahr erhöhen (O'NEILL 2016). Die Resistenzen gegen bekannte Antibiotika sind durch deren unsachgemäßen und breiten Einsatz in den letzten Jahren massiv angestiegen. Gleichzeitig ist die Entwicklung neuer Antibiotika an ihre Grenzen gestoßen. Dieses sogenannte „Antibiotika-Problem“ betrifft also die gesamte Gesellschaft und dies nicht nur in Deutschland, sondern weltweit. Zudem betrifft es Mensch, Tier und Umwelt und muss daher als *One-Health*-Problem betrachtet werden.

Die Leopoldina und ihre Kooperationspartner haben die Problematik der Antibiotika-resistenz bereits vor Jahren erkannt und darauf hingewiesen, so beispielsweise in einer Stellungnahme gemeinsam mit der Akademie der Wissenschaften Hamburg im Jahre 2013, mit einer Standortbestimmung fünf Jahre danach sowie im Rahmen des G7-Gipfels 2015 und des G20-Gipfels 2017 (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Akademie der Wissenschaften in Hamburg* 2017). Weiterhin wurde darauf aufmerksam gemacht, dass der evolutionäre Druck auf bakterielle Gemeinschaften permanent zunimmt. Selbst die kurzfristige Gabe von Antibiotika kann einen lang andauernden nachteiligen Einfluss auf solche Gemeinschaften haben. Verstärkt wird dies in Deutschland aktuell besonders durch internationale Reiseaktivitäten und den demographischen Wandel: immer mehr ältere, immungeschwächte Patienten mit langen Behandlungszeiten benötigen Antibiotika.

Im Jahr 2015 schlugen die G7-Akademien daher vor, Forschung und Produktion von neuen antimikrobiellen Wirkstoffen, Impfstoffen und Diagnostiktools zu beschleunigen, Schwerpunkte in der Forschungsagenda zu setzen, um Wissenslücken bei wichtigen Krankheiten zu schließen, die Errichtung globaler Überwachungsprogramme voranzutreiben, die Aufmerksamkeit in der Gesellschaft für das Antibiotikaproblem zu erhöhen und möglichst koordinierte, schnelle Reaktionen auf große Epidemien zu geben (*G7 Science Academies' Statement* 2015). Auch auf dem G20-Gipfel 2017 wurden verschiedene Strategien, vor allem in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen übertragbaren und nicht übertragbaren Erkrankungen, vorgeschlagen. Besonders die Gesundheitssysteme der verschiedenen Länder, die Lebensstile der Bevölkerungen und der Informationsaustausch wurden dabei adressiert (*G20 Germany* 2017). In den letzten Jahren wurde das Thema Antibiotikaresistenz in verschiedenen gesellschaftlichen Kontexten behandelt, und es sind auch bereits einige vielversprechende Entwicklungen zu verzeichnen, wie der *One-Health*-Ansatz in der Deutschen Antibiotika-Resistenz-Strategie (DART) oder die Etablierung neuer Forschungs- und Entwicklungsstrukturen (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Akademie der Wissenschaften in Hamburg* 2013).

2. Zweite Dimension – Resistenzen bei unterschiedlichen Erregern

Ganz unterschiedliche Mikroben und Pathogene – also Bakterien, Viren, Pilze und Parasiten – können Resistenzen gegen Antiinfektiva entwickeln. In Kliniken finden sich beispielsweise zunehmend Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus*-Bakterien (MRSA), die schwere Wundinfektionen, Pneumonie oder Sepsis verursachen können. Das Humane Immundefizienzvirus (HIV) steht in Bezug auf Resistenzen aktuell auf der Prioritätenliste der *World Health Organization* (WHO). Einige *Candida auris*-Stämme, Sprosspilze, die Schleimhäute befallen können, sind inzwischen gegen alle drei Hauptklassen von antifungalen Wirkstoffen resistent. Und gegen den Malaria Parasiten *Plasmodium falciparum*, der jährlich fast eine halbe Million Todesopfer fordert, gibt es aufgrund von Resistenzen nur noch wenige wirksame Medikamente (Abb. 1) (*Antimicrobial Resistance Benchmark* 2018).

Antibiotika wirken, in dem sie mit spezifischen Zielmolekülen der Erreger interagieren. Zu den Wirkmechanismen antibakterieller Wirkstoffe gehören z. B. die Hemmung der Proteinsynthese, die Hemmung der Zellwandsynthese oder die Hemmung der RNA- oder

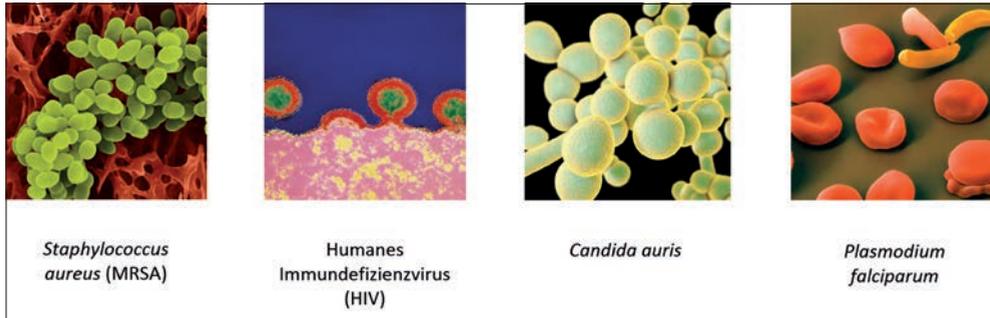


Abb. 1 Vier Gruppen von pathogenen Mikroorganismen mit hoher Priorität für die Eindämmung des antimikrobiellen Resistenzproblems: Bakterien, Viren, Pilze und Parasiten (modifiziert nach *Antimicrobial Resistance Benchmark* 2018; Abb. von Science Photo Library).

DNA-Synthese. Dabei blockiert das Antibiotikum in der Regel ein Enzym, das für einen bestimmten Stoffwechselweg benötigt wird, der Stoffwechsel- oder Syntheseweg kann nicht mehr ablaufen und der Krankheitserreger stirbt.

Zu den Resistenzmechanismen gehören eine verminderte Permeabilität der Zellmembran für die Antibiotika bzw. Effluxpumpen, die in der äußeren Membran der Zellen lokalisiert sind und Antibiotika aus den Zellen herauspumpen. Hierzu gehört aber auch die Produktion von Enzymen, die die Wirkstoffe inaktivieren. Bekannt ist hierbei die Enzymfamilie der β -Laktamasen, die durch Hydrolyse des β -Laktamrings Antibiotika wie Penicillin, Cephalosporine oder Carbapeneme unwirksam macht. Mitunter können Mikroorganismen bei Blockierung eines Stoffwechselweges auch einen alternativen Stoffwechselweg aktivieren und so überleben. Und schließlich, und dies ist von besonderer Bedeutung, findet man im Genom der Mikroorganismen häufig Mutationen, die zu strukturellen Veränderungen an den Zielmolekülen für Antibiotika führen. Die Antibiotika können nicht mehr richtig binden und verlieren ihre Wirksamkeit (MULVEY und SIMOR 2009).

Die Wechselwirkungen zwischen einem Zielmolekül und einem Antibiotikum können am Beispiel des Penicillin-bindenden Proteins 2 aus *Streptococcus pneumoniae* und Cefuroxim gut veranschaulicht werden. *S. pneumoniae* ist ein wichtiger Erreger von Atemwegserkrankungen und führt zu 1 Million Todesfällen pro Jahr. β -Lactamantibiotika, wie beispielsweise Cefuroxim, die sich von Penicillin ableiten, binden an das Protein und hemmen damit die Zellwandsynthese. Seit der Einführung von Penicillin in den 1940er Jahren haben sich zunehmend Resistenzen gegen β -Lactamantibiotika entwickelt und weltweit verbreitet. Wie in PERNOT et al. (2004) gezeigt, wird Cefuroxim kovalent über Serin 337 sowie über eine Wasserstoffbrücke zu Threonin 550 an das Penicillin-bindende Protein 2 gebunden. Kommt es zu einer Mutation von Threonin 550 zu Alanin, lösen sich die Bindungen, Cefuroxim kann sich im aktiven Zentrum des Enzyms nicht mehr halten und löst sich ab. Und kommt es gar zu einer Mutation von Glutamin 552 zu Glutaminsäure, so entsteht eine negative Ladung am Eingang zum aktiven Zentrum, und Cefuroxim kann überhaupt nicht mehr binden. Der Erreger ist gegen das Antibiotikum resistent geworden (PERNOT et al. 2004). Allerdings kann man im Rahmen der rationalen oder strukturbasierten Medikamentenentwicklung solche Mutationen mit etwas Glück sogar vorhersagen und sich neue Wirkstoffe ausdenken, die dann an die mutierten Enzyme der resistenten Erreger binden.

Neben Mutationen im Genom können Bakterien aber auch über Aufnahme bestimmter Resistenzgene verschiedene Resistenzen erwerben. Bakterien haben keinen Zellkern. Ihre DNA liegt frei im Zytoplasma, und oft findet man zusätzlich DNA in Form von kleinen ringförmigen Plasmiden. Bakterien vermehren sich eigentlich durch Teilung. Genetische Information kann aber auch über andere Wege, sozusagen horizontal, ausgetauscht werden. Zum einen ist dies über die sogenannte *Konjugation* möglich. Hierfür werden über Plasmabrücken zwischen den Bakterien direkt Resistenzplasmide ausgetauscht. Durch Biofilmbildung, also Schleimschichten, die sich oft an Grenzflächen z. B. von medizinischen Instrumenten finden, wird dies besonders begünstigt. Bei der *Transformation* können aktiv mit Hilfe von Transportsystemen DNA-Fragmente aus der Umgebung aufgenommen werden. Und mittels *Transduktion* wird Erbinformation von Viren, die man auch Bakteriophagen nennt, auf Bakterien übertragen.

Über all diese Mechanismen kann Resistenz erworben werden. Dies geschieht z. B. auf Intensivstationen, wo viele Antibiotika verabreicht werden und wo sich Erreger (etwa *Pseudomonas*) auf diese Weise gerne auch einmal mehrere Resistenzfaktoren aneignen, also multiresistent werden. Im schlimmsten Fall nehmen sie auch noch zusätzliche *Virulenzfaktoren* auf, die ihre Infektionskraft und krankmachende Wirkung sehr schnell erhöhen können. Teilweise können solche Erbinformationen auch in die DNA der Wirtszelle integriert und auch wieder ausgeschnitten werden. Nicht nur Plasmide, sondern auch Transposons oder genomische Inseln gehören zu diesen sogenannten beweglichen genetischen Elementen. Transposons sind DNA-Stücke, die ihre chromosomale Lokalisation ändern können. Daher werden sie auch als „springende Gene“ bezeichnet (DOBRINDT et al. 2004). Das Prinzip, dass bestimmte Gene innerhalb des Erbguts hin- und herspringen können, wurde von Barbara McCLINTOCK² erkannt, die 1983 dafür den Medizin-Nobelpreis erhielt. Viele erworbene antimikrobielle Resistenzen (AMR) sind mit beweglichen genetischen Elementen, wie Transposons, assoziiert (PARTRIDGE et al. 2018). Ein großer Durchbruch im Verständnis der Resistenzentwicklung konnte mit der Analyse der zahlreicher werdenden Genomsequenzierungen, vor allem auch pathogener Mikroorganismen, erreicht werden. Dabei wurde erkannt, dass pathogene Gene als genomische Inseln im Genom erscheinen und diese ständigen Veränderungen unterliegen. Genomische Inseln können, wie Transposons, ins Genom integriert und wieder ausgeschnitten werden (DOBRINDT et al. 2004). Einige Virulenzfaktoren sind in genomischen Inseln, den sogenannten Pathogenitätsinseln, kodiert (HO SUI et al. 2009). Durch die beweglichen genetischen Elemente kann die sonst sehr langsame Evolution schneller vonstattengehen, da beispielsweise Resistenzen nicht nur an die Tochtergenerationen, sondern durch horizontalen Gentransfer auch auf Nachbarzellen übertragen werden können.

Zusätzlich zu den genannten Mechanismen wird das Resistenzproblem durch sogenannte Persisterzellen verschärft. Diese repräsentieren einen kleinen Prozentsatz einer Bakterienpopulation, der vorübergehend antibiotikatolerant ist und somit eine Behandlung mit hohen Antibiotikadosen überleben kann.

Persisterzellen wurden in vielen Bakterienpopulationen im Labor, in der Klinik und in der Umwelt entdeckt und sind verantwortlich für wiederkehrende chronische Infektionen, was natürlich auch zu erhöhter Morbidität und Mortalität führt (DEFRAINE et al. 2018, CABRAL et al. 2018). Persisterzellen sind genetisch identisch mit dem Rest der Bakterien-

2 Barbara McCLINTOCK (1902–1992), US-amerikanische Botanikerin und Genetikerin.

population, haben aber passive und aktive Verteidigungsmechanismen gegen Antibiotika. Ein passiver Mechanismus ist, dass der Stoffwechsel massiv heruntergefahren wird, wodurch die Erreger weniger empfindlich gegen das Antibiotikum werden. Sogenannte Toxin-Antitoxin-Loci im Genom kodieren für ein Toxin, das die Bakterien in einen Ruhezustand versetzt. Zudem kodieren die Loci für ein Antitoxin, welches die Toxinwirkung neutralisiert. Weitere Mechanismen, wie der Nukleotid-Second-Messenger ppGpp oder die Indolsynthese, bestimmen die Persistenz von Bakterienzellen. Gleichzeitig arbeiten, als aktiver Verteidigungsmechanismus, in diesen Persisterzellen Effluxpumpen verstärkt, so dass das Antibiotikum aus der Zelle hinausbefördert wird (PU et al. 2017). Dies ist also eine perfekte Überlebensstrategie. Wird das Antibiotikum nun abgesetzt, können diese Zellen ihren Stoffwechsel wieder hochfahren, sich vermehren und zu wieder auftretenden schweren Infektionen führen. Deswegen sind Antipersistertherapien und Wirkstoffe gegen Persisterzellen zurzeit hochaktuell in der Forschung (DEFRAINE et al. 2018).

Interessanterweise wurden in den letzten Jahren auch die Resistenzen von Viren gegen antivirale Wirkstoffe intensiv untersucht. Antivirale Wirkstoffe sind gegen verschiedene Ziele in der viralen Replikation und der Proteinbiosynthese gerichtet. So werden z. B. gegen das Herpes-simplex-Virus, das Hepatitis-B-Virus und das humane Cytomegalievirus Nukleosidanaloga eingesetzt. Hepatitis-C-Infektionen und Infektionen mit dem HIV-Virus werden u. a. mit Proteaseinhibitoren behandelt.

Bei Influenzavirusinfektionen gibt es verschiedene antivirale Medikamente. Empfohlen werden die sogenannten Neuraminidaseinhibitoren (Handelsname: Tamiflu[®] oder Relenza[®]), die die Freisetzung neuer Viren aus infizierten Zellen verhindern (CDC-Center 2018, Robert-Koch-Institut 2017). Die meisten Influenzaviren zeigen noch Sensitivität gegen diese Wirkstoffe. Allerdings konnte die Entstehung resistenter Virusvarianten durch Selektionsdruck mit Oseltamivir (Tamiflu[®]) anhand von Verlaufsstudien bereits nachgewiesen werden (Robert-Koch-Institut 2017). Eine andere Klasse an Wirkstoffen, die sogenannten Adamantane, die die Freisetzung viraler RNA in das Zytoplasma der Wirtszelle inhibieren, werden in der Regel nicht als antivirale Therapie empfohlen, da eine Vielzahl an Influenzaviren verschiedener Subtypen als resistent getestet wurden und diese Wirkstoffe gegen Influenza-B-Viren nicht wirken (CDC-Center 2018).

Eine Behandlung von Virusinfektionen mit antiviralen Wirkstoffen sollte stark genug sein, damit eine Vermehrung des Virus inhibiert wird. Ist die Behandlung ineffektiv, können Viren sich weiter replizieren, und der Selektionsdruck könnte zu einer Resistenz des Virus gegen den antiviralen Wirkstoff führen. Verschlimmert wird dies durch eine große Viruspopulation und eine hohe Mutationsrate, die für viele Viren bekannt ist. Wenn eine Resistenz nicht schon durch einen Polymorphismus im Genom der Viruspopulation vorhanden ist, dann kann er leicht durch die Behandlung mit antiviralen Wirkstoffen entstehen. So erreichen z. B. Hepatitis-C-Viren durch ihre hohe Mutationsrate leicht eine Resistenz gegen die eingesetzten Proteaseinhibitoren (IRWIN et al. 2016). In Wirten, die mit dem humanen Cytomegalovirus infiziert sind, findet man eine hohe Diversität an Viruspopulationen (RENZETTE et al. 2013). Für die Replikation des HI-Virus ist die Reverse Transkriptase essentiell. Diese ist allerdings sehr fehleranfällig, so dass es zu einer hohen Mutationsrate im Genom kommt, was nicht nur zu einer großen Diversität innerhalb der Population führt, sondern auch die Bildung von Resistenzen erhöht (GÖTTE 2012). Auch die Reverse Transkriptase des Hepatitis-B-Virus hat keine *Proofreading*-Funktion, was zu einer hohen Mutationsrate führt (KHUDYAKOV 2010). Bei Influenzaviren kann es

durch Antigendrift zu Resistenzen gegen Neuraminidaseinhibitoren kommen. Auch der Antigenshift, der bei Viren mit segmentiertem Genom, wie beim Influenzavirus, möglich ist, kann zu neuen Subtypen führen, die eine erhöhte Fitness gegenüber antiviralen Wirkstoffen aufweisen.

Für die Entwicklung neuer Wirkstoffe gegen Influenzavirusinfektionen muss zunächst die Entstehung der Resistenzen gegen bestehende Wirkstoffe verstanden werden. LE et al. (2009) konnten z. B. mit Hilfe molekulardynamischer Simulation auf Atomebene die Wirkstoff-Protein-Interaktion von Tamiflu[®] und Relenza[®] mit der Neuraminidase zeigen. Sie fanden heraus, dass Wasserstoffbrückenbindungen eine wichtige Rolle bei der Wirkstoffbindung spielen. Mutationen in der Bindetasche der Neuraminidase und damit die Zerstörung der Wasserstoffbrückenbindungen können zu Resistenzen gegenüber dem Wirkstoff führen. Zudem zeigten sie, dass die negativ geladene Oberfläche am Eingang zur Bindetasche auch eine wichtige Rolle bei der Wirkstoffbindung spielt (LE et al. 2009). Auch die Aufklärung der Struktur der Neuraminidase verschiedener Influenzasubtypen auf atomarer Ebene ist eine wichtige Grundlage für die Entwicklung neuer Wirkstoffe gegen Influenzavirusinfektionen (RUSSEL et al. 2006).

Um den Resistenzen bei schweren viralen Erkrankungen begegnen zu können, werden teilweise schon Medikamentenkombinationen eingesetzt, da die Wahrscheinlichkeit, dass ein Virus gleichzeitig Resistenzen gegen mehrere Wirkstoffe aufweist, geringer ist, als bei einem Wirkstoff. Zudem werden Wirkstoffziele in der Wirtszelle des Virus vorge schlagen, da der Lebenszyklus von Viren stark von den Wirtszellfunktionen abhängt. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass Influenzaviren die Inhibierung des Raf/MEK/ERK-Signalweges, welcher für die effiziente Produktion von Viruspartikeln essentiell ist, nicht kompensieren können, auch nicht durch spezifische Mutationen (ALAM et al. 2016).

Während ständig neue Resistenzgene und -mechanismen entdeckt werden, sieht der Klinikalltag oft sehr bedenklich aus. So war 2007 im Universitätsklinikum Frankfurt ein Patient mit dem Resistenzkeim *Acinetobacter baumannii* infiziert. Hier bestand noch die Behandlungsmöglichkeit mit dem Reserveantibiotikum Colistin. Im Jahr 2013 hat auch dieses Antibiotikum keine Wirkung mehr gezeigt (GÖTTIG et al. 2016). Wie sah die zeitliche Entwicklung hin zu dieser Situation aus? Dies bringt uns zur nächsten Dimension.

3. Dritte Dimension – Zeitliche Entwicklung

Und hier sollten wir unbedingt nochmals auf Penicillin zu sprechen kommen. Im September 1928 kehrte Alexander FLEMING³ aus den Ferien nach London zurück. In seinem Labor fand er eine Petrischale mit *Staphylococcus aureus*, die mit einem Schimmelpilz befallen war. Um die Pilzkolonien herum hatten sich helle, regelmäßige bakterienfreie Höfe gebildet (FLEMING 1929). Die antibakterielle Wirkung des Schimmelpilzes *Penicillium* war entdeckt. Howard FLOREY⁴ und Ernst CHAIN⁵ erforschten dieses Phänomen weiter. Im März 1940 gelang es CHAIN, 40 mg des ersten Präparats von Penicillin zu isolieren. Untersuchungen an Mäusen zeigten, dass die neue aktive Substanz nichtproteinischer Natur war.

3 Alexander FLEMING (1881–1955), schottischer Mediziner und Bakteriologe.

4 Howard Walter FLOREY (1898–1968), australischer Pathologe.

5 Ernst Boris CHAIN (1906–1979), deutsch-britischer Biochemiker und Bakteriologe.

Norman HEATLEY⁶ verbesserte die Reinigung des Präparats, so dass bald darauf die Struktur des Penicillins durch Dorothy CROWFOOT HODGKIN⁷ aufgeklärt werden konnte. Ab Dezember 1941 wurde Penicillin industriell in mehreren amerikanischen Firmen hergestellt und im Zweiten Weltkrieg zum Wohle unendlich vieler Menschen eingesetzt. 1945 erhielten FLEMING, FLOREY und CHAIN den Nobelpreis für Medizin. Allerdings wurde bereits 1952 über Penicillinresistenzen bei Säuglingen in Sydney berichtet (PLISKA 2014). Interessanterweise nahm FLEMING in seiner Nobelpreisrede bereits zum Thema antimikrobielle Resistenzen Stellung: „Then there is the danger that the ignorant man may easily underdose himself and by exposing his microbes to non-lethal quantities of the drug make them resistant. [...] Moral: If you use penicillin, use enough.“ (FLEMING 1945.)

Und diese Einschätzung hat sich bis zum heutigen Tag gehalten, auch wenn aktuell sehr intensiv diskutiert wird, ob man nicht die Behandlungsdauer mit Antibiotika verkürzen und sich mehr an klinischen Symptomen orientieren sollte (URANGA et al. 2016, SPELLBERG 2016).

Die meisten Antibiotikaklassen, die gegen unterschiedliche Bakterienarten wirksam sind, wurden in den 1940er bis 1960er Jahren eingeführt. Bis heute sind mehr als 80 wirksame Antibiotika entwickelt worden, die jeweils eine andere Molekülgrundstruktur und Wirkungsweise haben. Danach gab es eine große und sehr bedenkliche Innovationslücke. In den 1980er und 1990er Jahren kamen praktisch keine neuen Klassen hinzu. Bestehende Klassen (Makrolide, Cephalosporine und Fluorchinolone) wurden lediglich erweitert. In den letzten 20 Jahren sind immerhin sechs neue Klassen eingeführt worden. Diese neuen Antibiotika sind aber fast alle mit dem Ziel entwickelt worden, vorhandene Resistenzen zu überwinden, d. h., sie sollen gegen Problemkeime wirken und stellen daher oft sogenannte Reserveantibiotika dar. 2018 kam zudem ein monoklonaler Antikörper heraus, der unterstützend zu einem Antibiotikum gegen den Darmkeim *Clostridium difficile* eingesetzt werden kann. 15 nicht Erreger-spezifische Antibiotika sind zurzeit in der Europäischen Union (EU) in der dritten Phase der klinischen Erprobung, im Zulassungsverfahren oder vor der Markteinführung. Acht weitere Antibiotika oder Antiinfektiva, die gezielt gegen bestimmte Bakterien eingesetzt werden sollen, sind in der EU mindestens in der klinischen Phase III (*Verband Forschender Arzneimittelhersteller* 2018).

Bei den in der *Antimicrobial Resistance Benchmark* 2018 erfassten Pipelines handelt es sich aktuell um 175 antimikrobielle Medikamente, die gegen Krankheitserreger wirken, die von der WHO und den US-amerikanischen *Centers for Disease Control and Prevention* (CDC) als die größten Bedrohungen in Bezug auf AMR angesehen werden. 40 Wirkstoffkandidaten befinden sich gerade in den späten Phasen der klinischen Entwicklung. Davon sind 28 Wirkstoffkandidaten Antibiotika und 12 andere antimikrobiell wirksame Produkte. Einige Antibiotika darunter sind neue Wirkstoffklassen mit neuen Wirkmechanismen. Allerdings gibt es nur für zwei davon konkrete Pläne in Bezug auf Zugänglichkeit und umsichtigen Einsatz. Dies ist allerdings bei der Markteinführung eines neuen Antibiotikums sehr wichtig, um die Resistenzentwicklung zu verlangsamen und die Möglichkeit der Nutzung dieses Antibiotikums zu maximieren (*Antimicrobial Resistance Benchmark* 2018).

Weil sich die Resistenzsituation zunehmend verschärft, besteht großer Bedarf an weiteren Antibiotika. Es ist äußerst schwierig, überhaupt noch Klassen mit neuem Wirkprinzip zu finden. Die Prozesskette der Wirkstoffentwicklung ist komplex, mit einer Dauer

6 Norman George HEATLEY (1911–2004), britischer Biochemiker und Biologe.

7 Dorothy CROWFOOT HODGKIN (1910–1994), britische Biochemikerin.

von ca. 15 Jahren ist sie sehr langwierig und mit durchaus ca. 1 Milliarde Euro sehr teuer. Die Prozesskette kann in verschiedene Phasen unterteilt werden (Abb. 2). In der präklinischen Forschungs- und Entwicklungsphase nimmt die Wirkstoffsuche (*drug discovery*) einen hohen Stellenwert ein. Zunächst muss allerdings durch verschiedene zell- und molekularbiologische Methoden, Genomik und Proteomik, ein geeignetes Zielmolekül identifiziert werden (*target discovery*), welches in den Pathogenitätsmechanismus involviert ist. Dies können z.B. Rezeptoren, Enzyme oder Hormone sein. Durch *Knock-out*-Modelle, Expressionsanalysen oder Strukturbiologie muss das Zielmolekül auf Relevanz innerhalb des Krankheitsprozesses validiert werden. Erst dann kann eine geeignete Leitstruktur eines Wirkstoffes identifiziert werden. Dafür werden verschiedene Methoden wie *High-throughput*-Screening, strukturbasiertes Design oder kombinatorische Chemie genutzt. Zeigt die Leitstruktur eine pharmakologische oder biologische Wirkung, kann diese weiter durch molekulares Modelling, medizinische Chemie o. ä. optimiert werden, um gewünschte Eigenschaften zu erhalten. Ein geeigneter Wirkstoffkandidat kann dann in die präklinischen Studien übergehen. Auf diese folgen die klinischen Studien mit drei Phasen. In der ersten Phase wird mit weniger als 100 Probanden, selten Patienten, auf Sicherheit und Verträglichkeit des Wirkstoffes geprüft. In der zweiten Phase wird an wenigen hundert Patienten die medizinische Wirksamkeit erstmals nachgewiesen. In Phase III werden mittels mehrerer tausend Patienten Daten zum Wirksamkeitsnachweis erhoben. Nach erfolgreicher klinischer Prüfung kann die Zulassung des Medikaments schlussendlich z.B. bei der *European Medicines Agency* (EMA, Europa) oder der *Food and Drug Administration* (FDA, USA) beantragt werden.

Diese Prozesskette gilt es zu optimieren und zu verkürzen. Dies reicht von der Charakterisierung der Zielmoleküle und Wirkstoffe über die präklinische und klinische Entwicklung bis hin zur Zulassung. Auch sind die Ertragsmöglichkeiten mit solchen Präparaten meist gering, weil sie eben als Reserveantibiotika möglichst selten zum Einsatz gelangen sollen und die Behandlungszeiten generell recht kurz sind. Daher ist es notwendig, dass öffentliche und private Partner gerade an dieser Schnittstelle eng zusammenarbeiten.

Im Januar 2017 präsentierte die WHO in Genf eine Liste mit den 12 wichtigsten resistenten Bakteriengruppen auf globaler Ebene. Je nach Dringlichkeit der Entwicklung neuer Antibiotika sind sie in kritische, hohe und mittlere Priorität unterteilt. Durch diese Priorisierung sollen die Forschung zu und die Entwicklung von neuen Antibiotika in die richtige Richtung geführt werden.

Die kritische Gruppe umfasst multiresistente Bakterien, die eine besondere Bedrohung in Krankenhäusern, Pflegeheimen und bei Patienten, deren Pflege z.B. Beatmung erfordert, darstellen. Dazu gehören *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* und verschiedene Enterobakterien (einschließlich *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Serratia* spp. und *Proteus* spp.). Sie können schwere und oft tödliche Infektionen wie Sepsis und Lungenentzündung verursachen. Diese Bakterien sind resistent gegen eine Vielzahl von Antibiotika, darunter Carbapeneme und Cephalosporine der dritten Generation, welche oft die letzten noch wirksamen Antibiotika sind. Die zweite und dritte Kategorie in der Liste, die hohe und mittlere Priorität, enthalten weitere antibiotikaresistente Bakterien, wie *Staphylococcus aureus*, *Salmonella* und *Haemophilus influenzae*, die viele verschiedene klinisch relevante Krankheitsbilder erzeugen können (*World Health Organization* 2017). Mykobakterien wurden nicht in die Prioritätenlisten aufgenommen, weil für sie bereits eine globale Priorität zur Entwicklung neuer Medikamente besteht.

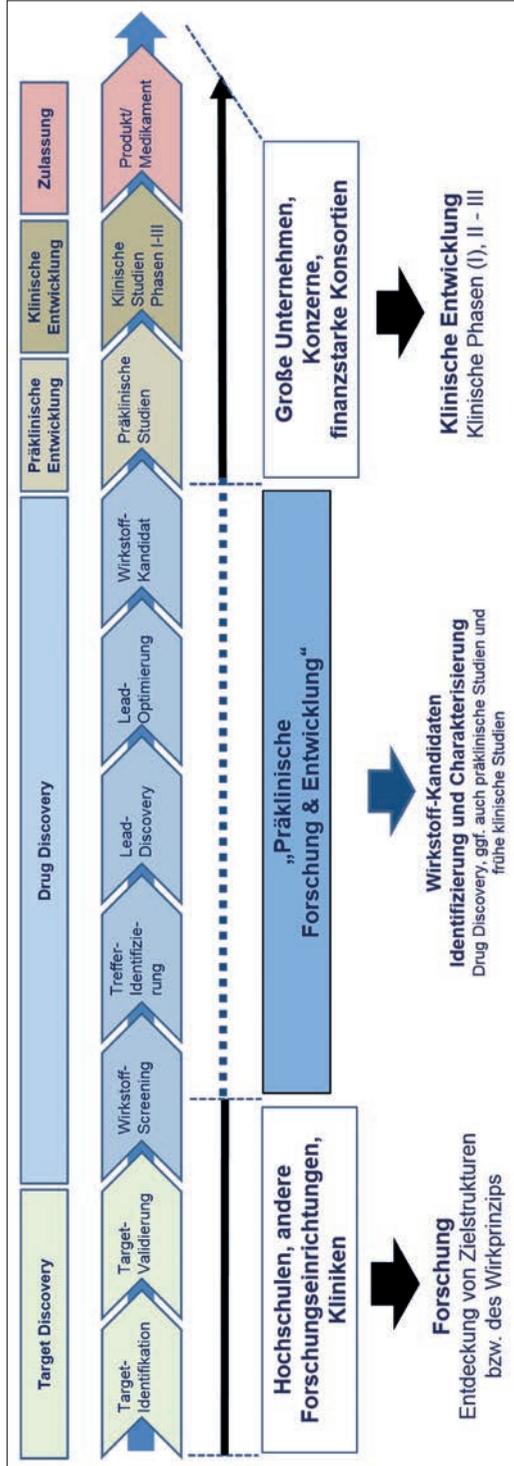


Abb. 2 Prozesskette der Wirkstoffentwicklung. Gezeigt sind die Phasen der Wirkstoffentwicklung sowie die einzelnen Zwischenschritte. Im Laufe der Prozesskette verlagert sich die Durchführung der einzelnen Phasen von Hochschulen und Forschungseinrichtungen in große Unternehmen und finanzstarke Konsortien.

4. Vierte Dimension – Manifestation

Antimikrobielle Resistenz kann jeden betreffen, in jedem Alter, in jedem Land. Sie bedroht Gesundheit, Lebensmittelsicherheit und Entwicklung. Sie tritt natürlicherweise in Bakterien auf, sie wird aber durch Antibiotikamissbrauch in Mensch und Tier massiv beschleunigt. AMR werden in einem kontinuierlichen Kreislauf zwischen Menschen, Tieren und Umwelt über Nahrung, Wasser und Düngemittel verbreitet. Damit werden das Ökosystem und unsere Gesundheit bedroht (*Tackling Antimicrobial Resistance and Antimicrobial Use* 2017).

In der Nutztierhaltung ist der Gebrauch von antimikrobiellen Substanzen alltäglich, da in der intensiven Tierhaltung die Gesundheit und so Produktivität gewährleistet bleiben muss. 2010 wurden weltweit 63151 t Antibiotika in der Nutztierhaltung eingesetzt. Nach einer Studie der *Princeton University* soll der Verbrauch auf 105 596 t im Jahr 2030 ansteigen. Bis zu einem Drittel des Verbrauchsanstiegs zwischen 2010 und 2030 ist auf eine Verlagerung der Produktionspraktiken in Ländern mit mittlerem Einkommen zurückzuführen, in denen extensive landwirtschaftliche Systeme durch groß angelegte intensive landwirtschaftliche Betriebe ersetzt werden, die routinemäßig Antibiotika in subtherapeutischen Dosen verwenden (VAN BOECKEL et al. 2015). In Deutschland wurden 2017 in der landwirtschaftlichen Tierhaltung 733 t Antibiotika verwendet. Das ist sehr viel, auch wenn diese Zahlen aktuell eher am fallen sind. So wurden im Jahre 2016 11,4% weniger Antibiotika in der Schweine- und Geflügelhaltung verbraucht als 2015. Den größten Anteil an abgegebenen antimikrobiell wirksamen Substanzen machen Penicilline und Tetracycline aus. Allerdings zeigen *Escherichia coli*-Bakterien, die bei Rindern Darmentzündungen auslösen können, bereits ein breites Resistenzspektrum. Das gleiche Problem wurde auch bei Schweinen festgestellt. Wie bei Rindern ziehen hier *E. coli*-Infektionen erhebliche wirtschaftliche Verluste nach sich. Durch die Resistenzen der Bakterien gegenüber verschiedenen Antibiotika wird das Problem weiter verstärkt. Beim Nutzgeflügel ist es *Staphylococcus aureus*, der multiple Resistenzen aufweist (*GERMAP 2015* 2016).

Nicht nur bei Nutztieren, sondern auch bei Nutzpflanzen werden antimikrobielle Mittel eingesetzt. Weiterhin finden sich in Böden teilweise schon messbare Antibiotikagradienten und in den Bodenbakterien Resistenzgene, die in identischer Form in resistenten Krankheitserregern vorkommen. Die Boden- und Wassermikroflora ist ein komplexes System und spielt eine kritische Rolle im Ökosystem (D’COSTA 2007).

In der Humanmedizin in Deutschland werden jährlich ca. 800 t Antibiotika verwendet (*GERMAP 2015* 2016), wobei der falsche Gebrauch von Antibiotika zu AMR führt (HOLMES et al. 2016). Eine der wichtigsten Manifestationen der AMR sind nosokomiale Infektionen, also Infektionen, die im zeitlichen Zusammenhang mit einer medizinischen Maßnahme stehen. In Deutschland haben wir jährlich ca. 500 000 nosokomiale Infektionen, die vor allem von *Staphylococcus aureus*, Enterobakterien und *Pseudomonas aeruginosa* hervorgerufen werden. Davon sind ca. 6% multiresistente Erreger und 0,3% multiresistente gramnegative Bakterien, die gleichzeitig gegen vier Gruppen von Antibiotika (Penicillin-Derivate, Cephalosporine, Carbapeneme, Fluorochinolone) resistent sind und oft Lungenentzündungen und Harnwegsinfekte hervorrufen (*Pseudomonas, Acinetobacter, E. coli, Klebsiella*) (GASTMEIER und FÄTKENHEUER 2015). Bereits die einmalige Gabe eines Antibiotikums kann die bakterielle Flora beispielsweise unseres Darms verändern. Die menschliche Darmflora enthält natürlicherweise eine Vielzahl von Bakterien, von denen

nur wenige eine Antibiotikaresistenz aufweisen. Nach Gabe eines Antibiotikums wird die Diversität der Darmbakterien reduziert, und Bakterien mit Antibiotikaresistenz blühen auf (MILLAN et al. 2016). Durch Kontakt bzw. Aufnahme von Wasser oder tierischen Lebensmitteln, die antibiotikaresistente Bakterien enthalten, kann zudem ein horizontaler Gentransfer zwischen den Pathogenen und Darmbakterien stattfinden, der wiederum zu neuen pathogenen Darmbakterien führt, die eine Antibiotikaresistenz aufweisen (PENDERS et al. 2013). Es gibt immer mehr Beweise, die den Zusammenhang zwischen Antibiotikanutzung in der Nutztierhaltung und antimikrobiellen Resistenzen in der Klinik aufzeigen (ROBINSON et al. 2016a).

Gleichzeitig sollte man wissen, dass die wenigsten resistenten Keime in den Krankenhäusern entstehen, sondern meist mitgebracht werden, oft auch aus dem Ausland, wie beispielsweise aus Indien oder Ägypten.

Die meisten nosokomialen Infektionen treten in der Intensivmedizin auf, gefolgt von Chirurgie und Innerer Medizin. Die Krankenhaushygiene sieht sich vor die große Herausforderung gestellt, die Balance zu finden zwischen Gesundheit der Patienten, der Notwen-

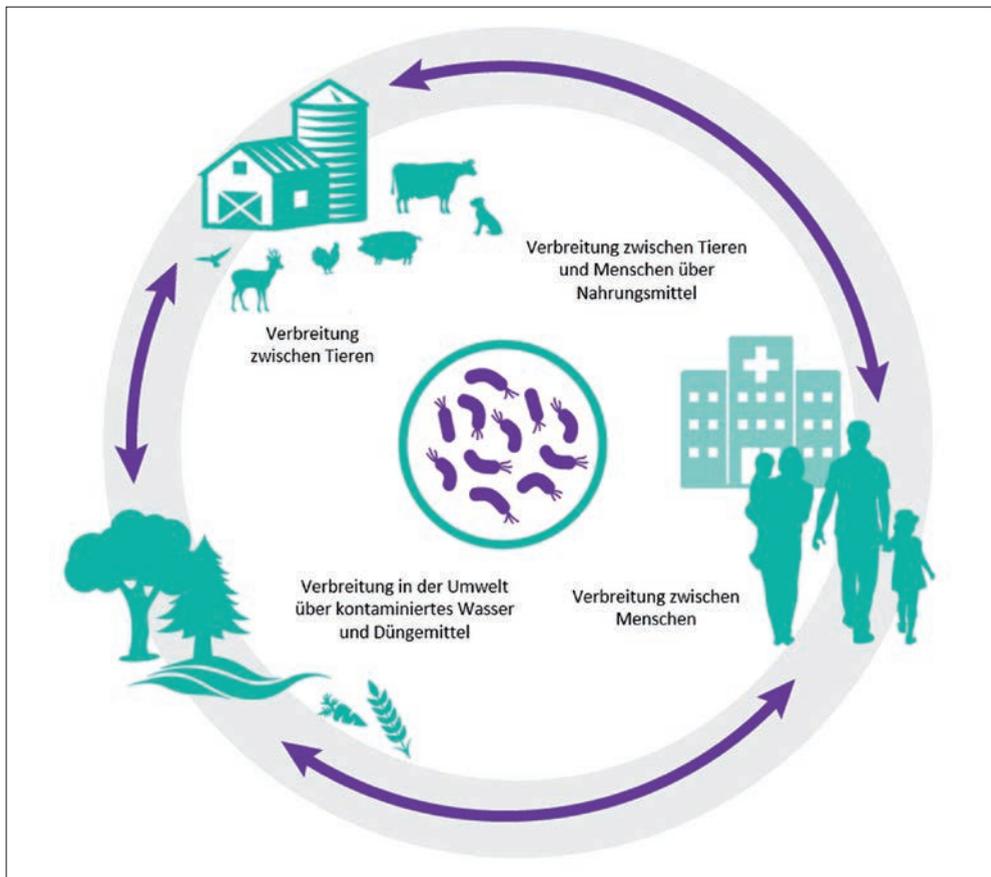


Abb. 3 *One-Health*-Problem der antimikrobiellen Resistenz. Die Abbildung verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Mensch, Tier und Umwelt in Bezug auf antimikrobielle Resistenzen. (Abb. modifiziert nach *Tackling Antimicrobial Resistance and Antimicrobial Use* 2017)

digkeit eines Eingriffs und ökonomischen Aspekten, die ja oft nur schwer zu beeinflussen sind. Verschärft wird die Situation durch Überfüllung der Kliniken und Zeitmangel des Personals. Verbesserungen könnten z. B. tägliche Infektionsvisiten, optimierte Hygienemaßnahmen und Diagnostik bringen.

Durch Reisetätigkeiten, Medizintourismus und den Welthandel können sich resistente Organsimen, die in einem Land entstanden sind, über die Landesgrenzen hinaus schnell verbreiten. Globalisierungsprozesse und Mobilität fördern nicht nur die Verbreitung, sondern auch die Neukombination von AMR-Genen, und es ist fast unmöglich, sich davor zu schützen (SOLOMON 2017). Hotspots für die Entwicklung und Verbreitung von Resistenzgenen in der Umwelt sind Industrieanlagen und Krankenhäuser. Besonders in Entwicklungsländern ist dies ein Problem, da es dort weniger strenge Umweltgesetzgebungen und inkonsequenter Durchsetzung gibt. AMR ist also in der Tat ein *One-World*- und ein *One-Health*-Problem. Der Gesundheitsansatz zur AMR-Problematik lautet also: Vernetzung von Tier, Mensch und Umwelt (Abb. 3). Dieser Ansatz rückt immer mehr in den Mittelpunkt, wenn es um die Bewältigung der komplexen öffentlichen Gesundheit geht, denn egal wie gut die Programme eines Landes zur Bekämpfung von Antibiotikaresistenzen auch sind, solange AMR-Gene kursieren, können diese jederzeit in das Land importiert werden und sich ausbreiten. Deswegen wurde 2015 von der Weltgesundheitsversammlung eine Resolution beschlossen, die für alle Mitgliedsländer verpflichtend ist und besagt, dass nationale Aktionspläne zur Bekämpfung von AMR bis 2017 an den globalen Standard anzugreifen sind (ROBINSON et al. 2016b).

5. Fünfte Dimension – Geographische Verteilung

Wie sieht es mit der geographischen Verbreitung der antimikrobiellen Resistenz in Deutschland, Europa und der Welt aus?

In Deutschland wurden Daten zur Entwicklung der Verbreitung verschiedener Resistenzen mit Hilfe des Krankenhausinfektionen-*Surveillance*-Systems (KISS) zwischen 2007 und 2014 erhoben. Für die Vancomycin-Resistenz in Enterokokken (VRE) in Deutschland zwischen 2007 und 2014 beispielsweise gibt es eine deutliche Zunahme, wobei sich das Verteilungsmuster ändert. In den Jahren 2007 und 2008 hatten Hessen und Sachsen-Anhalt mit über 10% die höchsten VRE-Raten. Bis 2014 sind die Raten in den beiden Bundesländern auf 5 bis 7,5% gesunken. Auffällig ist die niedrige Rate unter 2,5% in den Jahren 2007/2008 in Bayern, Baden-Württemberg und Mecklenburg-Vorpommern. Allerdings sind diese Raten bis 2014 auf 2,5 bis 5% in Bayern und Baden-Württemberg bzw. auf 5 bis 7,5% in Mecklenburg-Vorpommern angestiegen. Einen drastischen Anstieg der VRE-Rate gab es seit 2009 in Nordrhein-Westfalen von 2,5 bis 5% auf über 10% innerhalb von fünf Jahren. In Sachsen schwankt die VRE-Rate seit 2007 zwischen 7,5 und über 10%.

Für die Resistenzraten des Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA) zeigt sich ein ganz anderes Bild. In Nord- und Westdeutschland liegen die MRSA-Raten seit 2007 über 25%. Seit 2011 sind die Raten in Süddeutschland auf 10 bis 20% zurückgegangen. Baden-Württemberg kann einen Rückgang der Rate von über 25% im Jahre 2009 auf 10 bis 15% im Jahre 2014 verzeichnen (Robert-Koch-Institut 2016).

Vergleicht man die Vancomycin-Resistenz in *Enterococcus faecium* zwischen 2006 und 2016 in Europa, ist für Portugal ein Rückgang von 25 bis 50% auf 5 bis 10% und für

Frankreich ein Rückgang der Resistenzraten von 1 bis 5% auf unter 1% zu verzeichnen. Die skandinavischen Länder haben seit 2006 eine geringe Resistenzrate von 1 bis 5%. Allerdings ist eine deutliche Zunahme der Resistenzraten in vielen anderen Ländern zu sehen, insbesondere in Osteuropa, etwa in Polen, Lettland, der Slowakei und Rumänien. Irland und Griechenland haben seit 2006 unverändert hohe Resistenzraten von 25 bis 50%. Die Resistenzrate des Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* lag 2006 in Westeuropa, Großbritannien, Süd- und Südosteuropa bei 25 bis 50%. Rumänien hat sogar eine Rate von 50 bis 75%. Bis 2016 ist die Resistenzrate in Westeuropa, Großbritannien und Irland auf 10 bis 25% zurückgegangen. In Süd- und Südosteuropa ist das Bild im Jahre 2016 leider unverändert. Die geringsten MRSA-Resistenzraten haben Island und die skandinavischen Länder mit 1 bis 5% zu verzeichnen (*European Center For Disease Prevention and Control* 2018).

Bei einem weltweiten Vergleich von Resistenzdaten wird deutlich, dass die Datenlage limitierter ist, weil die Überwachung von AMR noch nicht überall funktioniert bzw. noch nicht sehr lange durchgeführt wird. Daher sind Vergleiche von verschiedenen Jahren nicht möglich. Für einige Länder liegen noch gar keine Daten vor. Dennoch zeigt der weltweite Vergleich der Vancomycin-Resistenzen in Enterokokken, dass insbesondere die USA mit Raten von ca. 75% sowie Argentinien und Australien mit ca. 50% betroffen sind. Bei der Oxacillin-Resistenz in *Staphylococcus aureus* haben wir zusätzlich z. B. in Kanada, Europa und Russland Problemzonen mit Raten von ca. 25%. Die USA, Indien, China und Argentinien haben sogar Raten von ca. 50%. Und bei der Carbapenem-Resistenz in *Acinetobacter baumannii* sind z. B. Mexico, China, Argentinien und einige Balkanländer mit Raten zwischen 75 und 100% besonders betroffen. Auch die USA und Russland zeigen Resistenzraten bis ca. 50% (*Center for Disease Dynamics, Economics & Policy* 2018).

Aktuelle Prognosen besagen, dass die Anzahl an Todesopfern durch AMR bis zum Jahr 2050 insbesondere in Asien und Afrika drastisch ansteigen wird. In beiden Kontinenten könnten jährlich über 4 Millionen Menschen an Infektionen mit antibiotikaresistenten Erregern sterben. In Europa, Nord- und Südamerika könnte es zwischen 300 000 und 400 000 Todesopfer jährlich geben (O'NEILL 2014).

6. Sechste Dimension – Lösungsansätze

Um das weltweite Problem der antimikrobiellen Resistenz zu lösen oder zumindest zu verringern, müssen Politik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft national und international miteinander agieren.

Die G7-Akademien schlugen bereits 2015 konkrete Maßnahmen dazu vor, und die Staats- und Regierungschefs der G7-Länder haben sich selbst dazu verpflichtet, die AMR-Agenda voranzutreiben (*G7 Science Academies's Statement* 2015). Dies wurde auf dem G7-Gipfel in Japan 2016 nochmals konsolidiert und korrespondiert eng mit dem *Global Action Plan on Antimicrobial Resistance* (*World Health Organization* 2015), der besagt, dass alle Mitgliedsstaaten bis 2017 ihre nationalen Aktionspläne an die globalen Standards anpassen sollen. Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat sich 2016 dazu bekannt, AMR gemeinsam zu bekämpfen. Auch die G20-Stellungnahme von 2017, die unter Federführung der Leopoldina erarbeitet wurde, zeigt Strategien und Instrumente auf, Krankheiten effektiver zu bekämpfen und die Gesundheitsversorgung zu verbessern (*G20*

Germany 2017). Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf dem Zusammenhang zwischen übertragbaren und nicht übertragbaren Krankheiten.

Was können die Politik, die Wissenschaft, die Wirtschaft und die Gesellschaft zur Lösung des AMR-Problems konkret beitragen?

Die Politik sollte die globale Überwachung von Infektionskrankheiten bei Mensch und Tier unterstützen, um Prognosen abgeben und schnell auf Ausbrüche reagieren zu können. Nationale und internationale Aktionspläne zur Bekämpfung von AMR sollten eng abgestimmt werden. Funktionierende Gesundheitssysteme und nachhaltige Forschungsinfrastrukturen sind genauso wichtig, wie die Wiederbelebung wirtschaftlicher Interessen an dem Thema. Unterstützt werden sollten außerdem die Leitlinienarbeit der Fachgesellschaften, die Aus- und Weiterbildung des klinischen Personals, die Karriereperspektiven in dem Fachgebiet, wie beispielsweise über das *Clinician Scientists*-Programm der DFG, sowie die Sensibilisierung der Öffentlichkeit (*Global Action Plan on Antimicrobial Resistance*, *World Health Organization* 2015).

Was kann die Wissenschaft beitragen? Wir müssen die Entwicklung von Antibiotika, Impfstoffen und Diagnostika auf allen Ebenen beschleunigen und auch gezielte Strategien für Prävention und rasche Diagnose entwerfen. Gemeinsam mit Politik und Wirtschaft sollte das Vorhalten von Reserveantibiotika beurteilt werden. Lücken in der Grundlagenforschung müssen identifiziert und geschlossen werden, und die Ergebnisse müssen dann auch in wirksame Behandlungsmethoden umgesetzt werden, idealerweise zusammen mit der Industrie, aber es wäre auch denkbar, dass die öffentliche Hand sich hier noch mehr zutraut, eventuell auch in internationalen Kooperationen. Wir müssen mehr lernen über Wirk- und Resistenzmechanismen von Antibiotika, über die ökologische und evolutionäre Dynamik mikrobieller Gemeinschaften und über Mikroben als Quelle neuer Substanzen. Auch sollten wir intensiv nachdenken über alternative Therapie- und Präventionsstrategien, z. B. durch Stärkung der körpereigenen Abwehr, mittels Bakteriophagen oder Probiotika.

Welche Lösungsansätze müssen wir im Bereich der Wirtschaft verfolgen? Unsere Industriepartner sind ganz besonders wichtig im Bereich der präklinischen und klinischen Entwicklung von Antibiotika. Gemäß der Pipeline der Medikamentenentwicklung müssen die Leitstrukturen, die oft aus akademischer Forschung stammen, optimiert werden, den sogenannten Machbarkeitsbeweis (*proof of principle*) erbringen und für die Zulassung zum Markt vorbereitet werden. Dies sind aufwändige und langwierige Prozesse, die leider oft scheitern. Wir müssen also öffentlich-private Partnerschaften fördern, neue Geschäftsmodelle entwickeln und das Interesse der Industrie an der Antibiotikaforschung wieder zum Leben erwecken, um mit neuen Wirkstoffkandidaten dieses sogenannte „Tal des Todes“ überwinden zu können. So erfolgte 2014 der Startschuss für den Pharma-Dialog der Bundesregierung mit Arzneimittelherstellern und Wissenschaft, in dem insbesondere auch das Problem der Antibiotikaresistenzen diskutiert wurde. Der Begriff Pharmadialog ist hierbei gut gewählt, denn in der Tat sprechen Wissenschaftler und Repräsentanten der Industrie meist völlig unterschiedliche Sprachen, und das Überwinden dieser Barrieren ist Voraussetzung für die inhaltliche Arbeit. Interessant ist beispielsweise auch der Bericht *Antimicrobial Resistance Benchmark* (2018) der *Access to Medicine Foundation*, finanziert von Großbritannien und den Niederlanden. Er betrachtet unabhängig, wie Pharmaunternehmen weltweit auf das AMR-Problem reagieren und wie man diese Reaktion eventuell noch verstärken kann (*Antimicrobial Resistance Benchmark* 2018). Aus früheren Deklarationen der

Industrie und der *Industry Roadmap 2017* ging die *AMR Industry Alliance* hervor, die die Aktivitäten der Pharmafirmen im Bereich der Antibiotikaforschung koordiniert.

Das AMR-Problem fordert aber auch gesellschaftliche Anstrengungen. Der Einsatz von Antibiotika im Gesundheitswesen und in der Landwirtschaft muss optimiert und reduziert werden. Hierzu muss die Öffentlichkeit für die Entstehung von Resistenzen und die Bekämpfung von Infektionskrankheiten sensibilisiert werden. Ängste müssen genommen und Risiken realistisch wahrgenommen werden. Programme zur Infektionsprävention und -bekämpfung, wie Impfungen und Hygienemaßnahmen, müssen weltweit umgesetzt werden, und der Zugang aller Bevölkerungsgruppen zu Gesundheitseinrichtungen muss sichergestellt werden. Und daher möchten wir mit einem Zitat von Margaret CHAN⁸ schließen. Sie sagte bereits im Jahre 2012 in Bezug auf Antibiotikaresistenzen: „But the threat, as you have noted, is indeed global, extremely serious, and growing. A post-antibiotic era means, in effect, an end to modern medicine as we know it.“ (CHAN 2012.) Und genau dies gilt es zu verhindern.

Literatur

- Akademie der Wissenschaften in Hamburg und Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften: Antibiotika-Forschung: Probleme und Perspektiven. Stellungnahme.* Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH 2013
- ALAM, M. I., MOSTAFA, A., KANRAI, P., MÜLLER, C., DZIECIOLOWSKI, J., LENZ, E., KUZNETSOVA, I., SCHULT-DIETRICH, P., ZIEBUHR, J., DIETRICH, U., and PLESCHKA, S.: Verapamil has antiviral activities that target different steps of the influenza virus replication cycle. *Journal of Antivirals and Antiretrovirals* 8, 121–130 (2016)
- Antimicrobial Resistance Benchmark.* Access to Medicine Foundation (2018)
- CABRAL, D. J., WURSTER, J. I., and BELENKY, P.: Antibiotic persistence as a metabolic adaptation: Stress, metabolism, the host, and new directions. *Pharmaceuticals* 11, pii: E14 (2018)
- CDC-Center (CDC-Center for Disease Control and Prevention): Influenza Antiviral Drug Resistance. <https://www.cdc.gov/flu/about/qa/antiviralresistance.htm> (2018)
- Center for Disease Dynamics, Economics & Policy: Resistance Map. <https://resistancemap.cddep.org/AntibioticResistance.php> (2018)
- CHAN, M.: Antimicrobial Resistance in the European Union and the World. The EU's Contributions to the Solutions of the Global Antimicrobial Resistance Problem. Keynote Address at the Conference on Combating Antimicrobial Resistance: Time for Action. Denmark (2012)
- D' COSTA, V. M., GRIFFITHS, E., and WRIGHT, G. D.: Expanding the soil antibiotic resistome: exploring environmental diversity. *Current Opinion in Microbiology* 10, 481–489 (2007)
- DEFRAINE, V., FAUVART, M., and MICHIELS, J.: Fighting bacterial persistence: Current and emerging anti-persister strategies and therapeutics. *Drug Resistance Update* 38, 12–26 (2018)
- DOBRINDT, U., HOCHHUT, B., HENTSCHEL, U., and HACKER, J.: Genomic islands in pathogenic and environmental microorganisms. *Nature Reviews Microbiology* 2, 414–424 (2004)
- European Centre for Disease Prevention and Control (ECDC): Data from the ECDC Surveillance Atlas – Antimicrobial resistance.* <https://www.ecdc.europa.eu/en/antimicrobial-resistance/surveillance-and-disease-data/data-ecdc> (2018)
- FLEMING, A.: On the antibacterial action of cultures of a penicillium, with special reference to their use in the isolation of B. influenzae. *British Journal of Experimental Pathology* 10, 226–236 (1929)
- FLEMING, A.: Penicillin – Nobel Lecture, December 11, 1945. www.nobelprize.org
- G7 Science Academies's Statement 2015: Infectious Diseases and Antimicrobial Resistance: Threats and Necessary Actions.* (2015)

8 Margaret CHAN FUNG FU-CHUN (*1947), Generaldirektorin der Weltgesundheitsorganisation 2006–2017.

- G20 Germany 2017: Improving Global Health, Strategies and Tool to Combat Communicable and Non-communicable Diseases.* (2017)
- GASTMEIER, P., und FÄTKENHEUER, G.: Infektiologie: Dilemma mit Begriffen und Zahlen. Deutsches Ärzteblatt 112/15, A-674/B-576/C-559 (2015)
- GERMAP 2015 (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit und Paul-Ehrlich-Gesellschaft für Chemotherapie e.V.): GERMAP 2015. Antibiotika-Resistenz und -Verbrauch. Bericht über den Antibiotikaverbrauch und die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen in der Human- und Veterinärmedizin in Deutschland. Rheinbach: Antiinfectives Intelligence 2016
- GÖTTE, M.: The distinct contributions of fitness and genetic barrier to the development of antiviral drug resistance. *Current Opinion in Virology* 2, 644–650 (2012)
- GÖTTIG, S., GRUBER, T. M., HIGGINS, P. G., WACHSMUTH, M., SEIFERT, H., and KEMPF, V. A.: Detection of pan drug-resistant *Acinetobacter baumannii* in Germany. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy* 69, 2578–2579 (2014)
- HO SUI, S. J., FEDYNAK, A., HSIAO, W. W., LANGILLE, M. G., and BRINKMANN F. S.: The association of virulence factors with genomic islands. *PLoS One* 4, e8094 (2009)
- HOLMES, A. H., MOORE, L. S., SUNDSFJORD, A., STEINBAKK, M., REGMI, S., KARKEY, A., GUERIN, P. J., and PIDDOCK, L. J.: Understanding the mechanisms and drivers of antimicrobial resistance. *The Lancet* 387, 176–187 (2016)
- IRWIN, K. K., RENZETTE, N., KOWALIK, T. F., and JENSEN, J. D.: Antiviral drug resistance as an adaptive process. *Virus Evolution* 2/1, vew014 (2016)
- KHUDYAKOV, Y.: Coevolution and HBV drug resistance. *Antiviral Therapy* 15, 505–515 (2010)
- LE, L., LEE, E., SCHULTEN, K., and TRUONG, T. N.: Molecular modeling of swine influenza A/H1N1, Spanish H1N1, and avian H5N1 flu N1 neuraminidases bound to Tamiflu and Relenza. *PLoS Currents* 4, 1:RRN1015 (2009)
- MILLAN, B., PARK, H., HOTTE, N., MATHIEU, O., BURGUIERE, P., TOMPKINS, T. A., KAO, D., and MADSEN, K. L.: Fecal microbial transplants reduce antibiotic-resistant genes in patients with recurrent *Clostridium difficile* infection. *Clinical Infectious Diseases* 62, 1479–1486 (2016)
- MULVEY, M. R., and SIMOR, A. E.: Antimicrobial resistance in hospitals: How concerned should we be? *Canadian Medical Association Journal* 180, 408–415 (2009)
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Akademie der Wissenschaften in Hamburg: Antibiotikaforschung: Probleme und Perspektiven.* Berlin, Boston: Walter de Gruyter 2013
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina und Akademie der Wissenschaften in Hamburg: Antibiotikaforschung: 5 Jahre danach. Was hat sich getan, was bleibt zu tun?* Halle (Saale) 2017
- O'NEILL, J.: Antimicrobial Resistance: Tackling a crisis for the health and wealth of nations. *Review on Antimicrobial Resistance* (2014)
- O'NEILL, J.: Tackling drug-resistant infections globally: Final report and recommendations. *Review on Antimicrobial Resistance* (2016)
- PARTRIDGE, S. R., KWONG, S. M., FIRTH, N., and JENSEN, S. O.: Mobile genetic elements associated with antimicrobial resistance. *Clinical Microbiology Reviews* 31, e00088–17 (2018)
- PENDERS, J., STOBBERINGH, E. E., SAVELKOUL, P. H., and WOLFFS, P. F.: The human microbiome as a reservoir of antimicrobial resistance. *Frontiers in Microbiology* 4, 87 (2013)
- PERNOT, L., CHESNEL, L., LE GOUELLEC, A., CROIZÉ, J., VERNET, T., DIDEBERG, O., and DESSEN, A.: A PBP2x from a clinical isolate of *Streptococcus pneumoniae* exhibits an alternative mechanism for reduction of susceptibility to β -lactam antibiotics. *Journal of Biological Chemistry* 279, 16463–16470 (2004)
- PLISKA, V.: Penicillin und Sulfonamide im Kampf gegen Infektionen: zwischen Begeisterung und Skepsis. *Bio-Fokus* Nr. 87. Zürich: Forschung für Leben 2014
- PU, Y., KE, Y., and BAI, F.: Active efflux in dormant bacterial cells – New insights into antibiotic persistence. *Drug Resistance Update* 30, 7–14 (2017)
- RENZETTE, N., GIBSON, L., BHATTACHARJEE, B., FISHER, D., SCHLEISS, M. R., JENSEN, J. D., and KOWALIK, T. F.: Rapid intrahost evolution of human cytomegalovirus is shaped by demography and positive selection. *PLoS Genetics* 9, e1003735 (2013)
- Robert-Koch-Institut: Epidemiologisches Bulletin* Nr. 22 (2016)
- Robert-Koch-Institut: Untersuchung zur antiviralen Resistenz von Influenzaviren.*
https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/NRZ/Influenza/arbeitsbereiche/molek_Epid.html (2017)
- ROBINSON, T. P., WERTHEIM, H. F., KAKKAR, M., KARIUKI, S., BU, D., and PRICE, L. B.: Animal production and antimicrobial resistance in the clinic. *The Lancet* 387, e1–e3 (2016a)

- ROBINSON, T. P., BU, D. P., CARRIQUE-MAS, J., FÈVRE, E. M., GILBERT, M., GRACE, D., HAY, S. I., JIWAKANON, J., KAKKAR, M., KARIUKI, S., LAXMINARAYAN, R., LUBROTH, J., MAGNUSON, U., THI NGOC, P., VAN BOECKEL, T. P., and WOOLHOUSE, M. E.: Antibiotic resistance is the quintessential One Health issue. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene* 110, 377–380 (2016b)
- RUSSELL, R. J., HAIRE, L. F., STEVENS, D. J., COLLINS, P. J., LIN, Y. P., BLACKBURN, G. M., HAY, A. J., GAMBLIN, S. J., and SKEHEL, J. J.: The structure of H5N1 avian influenza neuraminidase suggests new opportunities for drug design. *Nature* 443, 45–49 (2006)
- SOLOMON, S. L.: The Unique Contribution of One Health to Combating Antibiotic Resistance. *One Health, AMR Control* (2017)
- SPELLBERG, B.: The new antibiotic mantra – “Shorter is better”. *JAMA Internal Medicine* 176, 1254–1555 (2016)
- Tackling Antimicrobial Resistance and Antimicrobial Use: Tackling Antimicrobial Resistance and Antimicrobial Use. A Pan-Canadian Framework for Action.* Health Canada (2017). Reproduced and translated with permission from the Minister of Health, 2018. © All rights reserved.
- URANGA, A., ESPAÑA, P. P., BILBAO, A., QUINTANA, J. M., ARRIAGA, I., INTXAUSTI, M., LOBO, J. L., TOMÁS, L., CAMINO, J., NUÑEZ, J., and CAPELASTEGUI, A.: Duration of antibiotic treatment in community-acquired pneumonia: A multicenter randomized clinical trial. *JAMA Internal Medicine* 176, 1257–1265 (2016)
- VAN BOECKEL, T. P., BROWER, C., GILBERT, M., GRENFELL, B. T., LEVIN, S. A., ROBINSON, T. P., TEILLANT, A., and LAXMINARAYAN, R.: Global trends in antimicrobial use in food animals. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112, 5649–5654 (2015)
- Verband Forschender Arzneimittelhersteller: Neue Antibiotika: Den Vorsprung gegenüber resistenten Bakterien wahren.* www.vfa.de. Stand: 16. 10.2018
- World Health Organization: Global Action Plan on Antimicrobial Resistance.* (2015)
- World Health Organization: Global Priority List of Antibiotic-Resistant Bacteria to Guide Research, Discovery, and Development of New Antibiotics.* www.who.int (2017)

Dr. Julia HAHN
Justus-Liebig-Universität Gießen
Biochemie und Molekularbiologie
Heinrich-Buff-Ring 26–32
35392 Gießen
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 641 9939127
E-Mail: julia.hahn@nutr.jlug.de

Prof. Dr. Katja BECKER
Justus-Liebig-Universität Gießen
Biochemie und Molekularbiologie
Heinrich-Buff-Ring 26–32
35392 Gießen
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 641 9939121
Fax: +49 641 9939129
E-Mail: katja.becker@uni-giessen.de

Palliativmedizin

Lukas RADBRUCH ML (Bonn)



Zusammenfassung

Der Auf- und Ausbau der Palliativversorgung ist in Deutschland in den letzten 20 Jahren weit vorangekommen. Schwerstkranke und sterbende Menschen können ambulant und stationär in spezialisierten Einrichtungen wie Palliativstationen oder SAPV¹-Teams versorgt werden. Allerdings gibt es trotz aller Fortschritte immer noch Lücken in der Versorgung. In ländlichen Bereichen, für die Bewohner von Pflegeeinrichtungen oder für Patienten mit anderen unheilbaren Erkrankungen als Tumorerkrankungen ist der Zugang zur Palliativversorgung oft erschwert. Im akademischen Bereich wird Palliativmedizin langsam etabliert, was sich auch in einer zunehmenden Forschungstätigkeit niederschlägt. Dennoch fehlen in vielen Bereichen klinische Studien speziell zur Symptomkontrolle, wofür in den vergangenen Jahren nur wenige Studien zur Schmerzlinderung durchgeführt wurden. In der S3-Leitlinie Palliativmedizin bei Patienten mit Krebserkrankung, die 2017 im AWMF²-Leitlinienprogramm entwickelt wurde, beruhen mehr als die Hälfte der 209 Empfehlungen auf dem Konsens der Experten, weil eine evidenzbasierte Empfehlung mangels klinischer Studien nicht möglich war.

Mit der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina wurde 2015 eine Forschungsagenda für die Palliativversorgung vorgelegt. Relevante Forschungsfragen wurden für elf Bereiche identifiziert, von der biomedizinischen Grundlagenforschung über medizintechnische Forschung bis zu psychosozialen, spirituellen, rechtlichen und ethischen Fragestellungen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat – nicht zuletzt mit Bezug auf die Stellungnahme der Leopoldina – vor kurzem eine Förderung für Forschung in der Palliativversorgung ausgeschrieben. Es steht zu hoffen, dass wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der Hospiz- und Palliativversorgung in Deutschland aus diesen Projekten entstehen.

Abstract

The initiation and implementation of palliative care has made tremendous progress in Germany in the last two decades. An increasing number of specialist services for the care of severely ill and dying patients is available for inpatients or at home. However, there are still some gaps in the provision of palliative care. Patients in rural areas, residents of nursing homes or patients with life-limiting non-cancer diseases find it harder to access adequate palliative care. Palliative Medicine as an academic field is also growing, resulting in increasing research activities. Nevertheless, clinical research is still scarce in many areas, and especially for symptom control, where only very few clinical trials on pain management have been published. The evidence-based guideline on palliative care for patients with cancer, developed in 2017 in the Association of the Scientific Medical Societies in Germany (AWMF), contains 209 statements, but more than half are based on expert consensus due to a lack of evidence from clinical trials.

The National Academy of Science Leopoldina produced a research agenda for palliative care in 2015. Relevant research questions were defined for 11 areas, ranging from basic biomedical research to medical technology and beyond to spiritual, ethical and legal questions. The German Ministry of Research and Education has – not least due to this research agenda – initiated a call for research applications in palliative care. It is to be hoped that the results from this research will foster further development of hospice and palliative care in Germany.

1 SAPV – Spezialisierte ambulante Palliativversorgung.

2 AWMF – Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V.

1. Ein Beispiel

Gabriele S. ist 46 Jahre alt und leidet an einem weit fortgeschrittenen Bronchialkarzinom. Sie ist schon seit längerem im Universitätsklinikum und in onkologischer Behandlung. Die Chemotherapie musste mittlerweile wegen schwerer Nebenwirkungen abgebrochen werden, und sie wurde vor wenigen Tagen auf die Palliativstation verlegt. Dort berichtet sie vor allem über die starken Schmerzen an der linken Körperseite. Diese Schmerzen sind besonders stark, auf einer numerischen Rangskala (NRS, 0 = kein Schmerz, 10 = nicht stärker vorstellbarer Schmerz) gibt sie die Intensität mit NRS 10 an. Zusätzlich klagt sie über Luftnot, Übelkeit und Brechreiz, diese Symptome sind jedoch nicht sehr stark. Die Schmerztherapie wird auf der Palliativstation umgestellt auf ein starkes Opioid (Hydromorphon) und in den nächsten Tagen mehrfach in der Dosis erhöht. Bei einer Gesamtdosis von 48 mg Hydromorphon pro Tag ist die Schmerzlinderung endlich ausreichend.

Leider ist aber mittlerweile die Luftnot stärker geworden. Dabei ist es nicht nur die Luftnot, die sie aktuell jeweils erlebt, sondern jede Zunahme der Luftnot ist für die Patientin immer auch mit der großen Angst verbunden, dass sie vielleicht einmal in einem solchen Anfall qualvoll ersticken muss. Die einzelnen Episoden der Luftnot können jeweils gut mit Benzodiazepinen und schnell wirkenden Opioiden behandelt werden. Zusätzlich zu den medikamentösen werden andere Maßnahmen eingesetzt. So wird ein Pleuraerguss mehrfach abpunktiert, um die mechanische Beeinträchtigung der Atmung durch den Erguss zu beseitigen. Frischluftzufuhr (z. B. durch Handventilator oder Öffnen des Fensters) ist ebenfalls wichtig, vor allem aber wird versucht, die Patientin und ihre Angehörigen immer wieder zu beruhigen und nicht alleine zu lassen, wenn eine Episode mit verstärkter Luftnot auftritt. Dennoch wird die Angst vor dem Ersticken immer übermächtiger.

Nach einigen Tagen wird mit der Patientin deshalb über eine palliative Sedierung gesprochen. Eine solche Sedierung kann eingesetzt werden, wenn Symptome nicht mit anderen Maßnahmen ausreichend (oder ausreichend schnell) gelindert werden können. Wenn die Symptomintensität nicht auf ein erträgliches Maß gelindert werden kann, kann der Patient in einen künstlichen Dauerschlaf versetzt werden, so dass er die quälenden Symptome zumindest nicht mehr bewusst erleben muss. Der Patientin wird eine solche Sedierung angeboten, für den Fall, dass eine Linderung der Luftnot nicht mehr gewährleistet werden kann und bevor sie unter dem Gefühl des Erstickens am Lebensende leiden müsste. Die Informationen über diese Möglichkeit alleine reichen schon aus, um die Patienten und ihre Angehörigen zu beruhigen.

In den nächsten zwei Wochen muss die Medikation zur Symptomkontrolle mehrfach angepasst werden, aber stets kann eine ausreichende Wirkung gewährleistet werden. Die Patientin fühlt sich auf der Palliativstation sicher, eine Verlegung in ein stationäres Hospiz wird vom Behandlungsteam angedacht. Dann aber verschlechtert sich der Zustand im Rahmen der fortschreitenden Grunderkrankung. Gleichzeitig nehmen die Luftnot und insbesondere die damit verbundene Angst wieder zu. Auf Bitte der Patientin wird nun eine palliative Sedierung eingeleitet. Über eine Medikamentenpumpe wird Midazolam intravenös verabreicht, bis die Patientin tief schläft. Zwei Tage nach Beginn der Sedierung verstirbt die Patientin infolge der Grunderkrankung.

2. Definition

Das Beispiel zeigt das Spektrum der Palliativversorgung bei schwerstkranken und sterbenden Patienten. Es geht um Symptomlinderung, aber auch um eine umfassende Betreuung, die neben den körperlichen Symptomen auch andere Probleme behandelt und lindert.

Nach der Definition der Weltgesundheitsorganisation ist Palliativversorgung ein Ansatz zur Verbesserung der Lebensqualität von Patienten und ihren Angehörigen, die den Problemen einer lebensbedrohlichen Erkrankung gegenüberstehen, durch die Prävention und Linderung von Leiden, durch frühe Identifikation sowie einwandfreie Erfassung und Behandlung von Schmerzen und anderen Problemen körperlicher, psychosozialer oder spiritueller Art (SEPULVEDA et al. 2002).

Im Gegensatz zu anderen Bereichen in der medizinischen Versorgung ist Palliativmedizin nicht auf bestimmte Erkrankungen oder ein Organsystem fokussiert, sondern auf ein breites Spektrum von schweren und fortschreitenden Erkrankungen und betroffenen Organen.

Palliativversorgung hat sich als Übersetzung für den englischen Begriff „Palliative Care“ etabliert. Palliativmedizin wird oft synonym mit Palliativversorgung verwandt, stellt aber eigentlich den ärztlichen Anteil an der Palliativversorgung dar. Da die Versorgung der schwerstkranken und sterbenden Patienten ein interdisziplinäres und multiprofessionelles Vorgehen erfordert, wird im Folgenden der Begriff Palliativversorgung benutzt.

Hospizarbeit (*Hospice Care*) wird ebenfalls oft synonym mit Palliativversorgung benutzt. In Deutschland wird Hospizarbeit jedoch eher mit der Bedeutung einer Philosophie der Betreuung benutzt, vor allem für Betreuungsleistungen, die ihre Wurzeln in einer Bürgerbewegung haben und stark auf ehrenamtlichem Engagement basieren, wohingegen Palliativversorgung – und noch spezifischer Palliativmedizin – als medizinischer Fachbereich angesehen wird. Während Palliativversorgung vor allem von den Leistungserbringern als Teil des Gesundheitssystems erbracht wird, ist Hospizarbeit auch eine gesellschaftliche Aufgabe, mit der ein offener Umgang mit dem Lebensende, mit Sterben und Tod in der Gesellschaft thematisiert wird.

3. Symptomlinderung

Die Mehrzahl der Patienten mit fortgeschrittenen und lebensbedrohlichen Erkrankungen leidet unter Schmerzen, Luftnot oder anderen körperlichen Symptomen. Die anhaltende Belastung durch solche Beschwerden kann Patienten körperlich und seelisch zermürben. Ständige Schmerzen können ebenso wie andere Symptome die körperliche Funktionsfähigkeit beeinträchtigen, zu Angst und Depression führen und insgesamt die Lebensqualität der Betroffenen entscheidend beeinträchtigen.

Trotz dieser Beeinträchtigung sind Patienten manchmal zurückhaltend in der Schilderung der Beschwerden gegenüber dem Behandlungsteam. Sie wollen den Arzt nicht von seinen Bemühungen zur Behandlung der Grunderkrankung ablenken oder sind der Meinung, dass solche Beschwerden eben nun einmal zu der Krankheit dazu gehören.

Eine systematische Erfassung von Schmerzen und anderen Symptomen ist deshalb eine wesentliche Voraussetzung für eine gute Symptomkontrolle. Dazu können kurze und einfache Fragebögen eingesetzt werden, in denen z.B. nach der Intensität von Schmerzen

(kein, leicht, mittel, stark) und anderen häufigen Symptomen in der Palliativversorgung gefragt wird (PLÖGER 2016, STIEL et al. 2010).

Für die Symptomkontrolle sollte geprüft werden, ob eine behandelbare Ursache vorliegt. Wie im vorangestellten Beispiel ausgeführt, ist bei einem Pleuraerguss die Entfernung der Flüssigkeit aus dem Pleuraspalt sinnvoller als eine symptomlindernde Medikation alleine. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Patienten werden aber zusätzlich oder ausschließlich symptomlindernde Maßnahmen sinnvoll sein. Diese können aus einer entsprechenden Medikation, nicht medikamentösen Maßnahmen oder einer Kombination von beidem bestehen. Beispielhaft sollen im Folgenden die Grundsätze der Behandlung von Schmerzen und Luftnot sowie von Appetit- und Gewichtsverlust dargestellt werden.

3.1 Schmerzen

Für die Behandlung von Tumorschmerzen liegen anerkannte Leitlinien vor (*Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin* 2015, *World Health Organization* 1990). Die Schmerzmedikation sollte nicht nur bei Bedarf, sondern als Dauertherapie mit festen Einnahmezeiten erfolgen. Die Anwendung sollte oral oder transdermal (über die Haut) erfolgen und nicht intravenös. Die Schmerzmittel sollten nach der Schmerzstärke eingesetzt werden: Bei leichten Schmerzen reichen Nichtopioid-Analgetika wie z. B. Metamizol oder nicht-steroidale Antiphlogistika wie Ibuprofen aus (Stufe 1). Bei mittleren bis starken Schmerzen sollten diese Medikamente mit einem Opioid der Stufe 2 kombiniert werden, z. B. Tramadol. Bei starken bis stärksten Schmerzen sollten diese Medikamente der Stufe 1 mit Opioiden der Stufe 3 kombiniert werden, z. B. Morphin, Hydromorphon, Oxycodon oder Fentanyl.

Auf allen drei Stufen können zusätzlich weitere Medikamente erforderlich werden, entweder gegen die Nebenwirkungen der Schmerzmittel oder zur Verstärkung der Effektivität bei bestimmten Schmerzsyndromen. So können, insbesondere in der Einstellungsphase einer Opioidmedikation, Müdigkeit, Übelkeit und Verstopfung auftreten. Während Antemetika häufig nur in den ersten Tagen benötigt werden, sollten Laxantien jedoch für die Dauer der Therapie begleitend eingesetzt werden, da die opioidbedingte Verstopfung auch im weiteren Verlauf nicht nachlässt.

Wenn anfangs gut gelinderte Schmerzen im Verlauf wieder stärker werden, ist dies fast immer im Zusammenhang mit dem Fortschreiten der Grunderkrankung zu sehen. Dosisanpassungen oder Umstellungen auf eine höhere Stufe können im Verlauf immer wieder notwendig sein. Wenn Dosissteigerungen nur noch zu einer Zunahme der Nebenwirkungen, nicht aber zu einer besseren Schmerzlinderung führen, kann eine Umstellung auf ein anderes Opioid sinnvoll sein (Opioidrotation).

Mit diesen wenigen einfachen Grundsätzen können Tumorschmerzen bei der überwiegenden Mehrzahl der Patienten ausreichend gelindert werden (ZECH et al. 1995).

Schmerzen können auch bei vielen anderen Krankheiten in der Palliativversorgung (z. B. bei Infektion mit dem Humanen Immunschwäche-Virus, Herzversagen, Lungenversagen) ein wesentliches Problem darstellen. Die Erfahrungen aus der Tumorschmerzbehandlung können auf diese Patientengruppen übertragen werden.

3.2 Luftnot

Luftnot ist als Symptom in der Palliativversorgung seltener als Schmerz, ist aber für die Betroffenen häufig beeinträchtigender und angsteinflößender. Die Patienten berichten, dass es nicht nur die aktuell gefühlte Luftnot ist, die sie belastet, sondern dass das Gefühl der Luftnot oft unmittelbar mit der Angst vor dem Erstickten verbunden ist.

Deshalb ist die Erfassung und Behandlung von Luftnot von hoher Bedeutung. Mögliche Ursachen wie z. B. mechanische Beeinträchtigungen der Atmung durch Pleuraergüsse, Ileus oder Ascites sollten, wenn möglich, beseitigt werden. Wenn eine tumorbedingte Blutung zu einem Mangel an roten Blutkörperchen als Sauerstoffträger führt, können Bluttransfusionen sinnvoll sein. Allerdings hält die Wirkung oft nur über wenige Tage an, so dass die Transfusionen regelmäßig wiederholt werden müssen. Das kann für die Patienten belastend sein, so dass gemeinsam mit dem Patienten auch immer wieder zu prüfen ist, wie weit eine solche Transfusionsbehandlung noch angemessen ist.

In der symptomatischen Behandlung stellen Opioide bei der Behandlung von Luftnot ebenso wie bei der Tumorschmerztherapie den Grundpfeiler dar (*Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin* 2015). Opioide lindern Schmerz und Angst und können dadurch schon den Atembedarf verringern. Unter der Therapie mit Opioiden ist die Atmung insgesamt verlangsamt, mit verringerter Atemfrequenz, bei gleichzeitig tieferen Atemzügen. Dadurch wird die Atmung ökonomischer, in dem mehr Atemluft am alveolären Austausch teilnimmt und die Totraumventilation verringert wird. Manche Ärzte scheuen den Einsatz von Opioiden bei Luftnot, weil sie eine opioidbedingte Atemdepression befürchten. Tatsächlich kann unter der Opioidmedikation eine physiologische Atemdepression auftreten, jedoch ist dieser Effekt durchaus erwünscht. Opioide führen zu einer Verstellung des Sollwertes an den Barorezeptoren am Glomus caroticum. Das führt aber dazu, dass der erhöhte Kohlendioxidpartialdruck, der vorher zu dem Gefühl von Luftnot geführt hat, nun nicht mehr als zu hoch und deshalb auch nicht mehr als Atemnot empfunden wird. In der Praxis der Palliativversorgung führt der Einsatz von Opioiden nun zu einer schnellen und effektiven Linderung der Luftnot.

Andere Medikamente können zusätzlich eingesetzt werden, z. B. Benzodiazepine bei ausgeprägter Angst und Panik oder Kortikosteroide bei tumorbedingten Schwellungen im Kopf- und Halsbereich oder den Atemwegen.

Neben den Medikamenten kommt den nichtmedikamentösen Maßnahmen bei der Behandlung der Luftnot besondere Bedeutung zu. Die Patienten sollten bei Episoden mit starker Luftnot nicht alleine gelassen werden. Oft wirkt die Zufuhr von Luft lindernd, auch wenn nur das Fenster geöffnet wird oder das Bett auf die Terrasse gebracht werden kann. Kleine batteriegetriebene Ventilatoren, die die Patienten in der Hand halten und mit denen sie den Luftstrom für sich selbst optimieren können, sind wirkungsvoller als große Ventilatoren im Zimmer. Sauerstoff ist nur selten hilfreich, obwohl viele Patienten davon fast abhängig zu sein scheinen. In der Praxis erlebe ich immer wieder, dass Patienten nicht einmal die Toilette aufsuchen wollen, weil der Schlauch für die Sauerstoffsonde nicht lang genug ist, und lieber ganz im Bett bleiben. Wenn sie dann einschlafen und die Sonde aus der Nase herausfällt, schlafen sie genauso ruhig weiter, ohne Anzeichen von Luftnot. Die Zufuhr von Sauerstoff kann durchaus auch Nebenwirkungen haben, z. B. Austrocknung der Schleimhäute im Mund- und Rachenraum oder Schlafstörungen durch das anhaltende Blubbern der Sauerstoffflasche am Bett. Bei einzelnen Patienten kann die Zufuhr

von Sauerstoff effektiv zur Linderung von Luftnot sein, jedoch sollte dies mit einem Therapieversuch sorgfältig untersucht werden, und bei fehlender Wirkung sollte die Sauerstoffzufuhr beendet werden.

Psychologische Interventionen können bei Luftnot ebenso wie bei Schmerzen oder anderen Symptomen eindrucksvoll wirken. Allerdings müssen die zum Einsatz kommenden Methoden dem Zustand und der kurzen Lebenserwartung der Patienten angepasst werden. Kurze und niederschwellige Interventionen wie z. B. Imagination oder Hypnose können zum Einsatz kommen, manchmal auch Entspannungsübungen.

Auch für die Behandlung von Luftnot gilt, dass die Erfahrungen bei Tumorpatienten gut auf andere Grunderkrankungen übertragen werden können. Der Einsatz von Opioiden ist bei Patienten mit fortgeschrittener Herz- oder Lungeninsuffizienz genauso wirksam.

3.3 Appetit- und Gewichtsverlust

Ein anhaltender Gewichtsverlust tritt nicht nur bei Patienten mit Tumorerkrankungen, sondern auch bei Patienten mit Herzerkrankungen, Lungenerkrankungen und vielen anderen lebensbedrohlichen Erkrankungen auf. Ein Gewichtsverlust von mehr als 2 kg in zwei Monaten oder 5 kg in einem halben Jahr oder bei einem *Body-Mass-Index* von weniger als 18,5 wird als Kachexie bezeichnet. Die möglichen Ursachen des Gewichtsverlustes sind vielfältig. Der Tumor setzt (wie eine chronische Entzündung) Zytokine frei. Störungen der Hormonproduktion, sowohl von Ghrelin im Magen-Darmtrakt wie in der Hypophysen-Hypothalamus-Achse, sind beschrieben. Tumor- und therapiebedingte gastrointestinale Symptome wie Appetitmangel, Übelkeit und Erbrechen erschweren die Nahrungsaufnahme. Geschmacksstörungen und Abneigungen gegen bestimmte Speisen (z. B. Fleisch) sind häufig.

Während in den frühen Stadien einer Tumorerkrankung eine Steigerung der Kalorienzufuhr durch Ernährungsberatung und Zusatznahrungsmittel das Auftreten oder zumindest das Fortschreiten der Kachexie verhindern kann, sind solche Maßnahmen in den fortgeschrittenen Stadien nicht mehr effektiv. Die Stoffwechsellage bleibt weiterhin katabol, und eine Erhöhung der Kalorienzufuhr führt nur zur Produktion von Entzündungsproteinen, nicht zum Wiederaufbau von Muskelmasse. Für die Therapieplanung ist deshalb wichtig, zwischen den frühen Stadien und der refraktären Kachexie zu unterscheiden (FEARON et al. 2011).

Die Zielsetzung in der Palliativversorgung bei fortgeschrittenen Krankheitsstadien wird deshalb nicht auf Erhalt oder Steigerung des Körpergewichts oder der Muskelmasse liegen. Für den Erhalt der Lebensqualität ist die Linderung der subjektiven Symptome wie Appetitmangel oder Übelkeit viel wichtiger. Das sinkende Körpergewicht spielt nur insoweit eine Rolle, als Patienten und Angehörige darin eine ständige Erinnerung an den Krankheitsverlauf sehen. Insbesondere die Angehörigen haben oft das Gefühl, dass nur mit ausreichender Nahrungszufuhr der Gewichtsverlust und so auch der Fortschritt der Erkrankung aufgehalten werden könnte. Nicht selten sind die Patienten selbst mittlerweile zu dem Entschluss gekommen, dass sie sich selber nicht mehr ständig zum Essen zwingen müssen, stehen damit aber im Konflikt mit ihren Angehörigen, die das als Aufgabe betrachten und den Patienten überzeugen wollen, dass er weiter gegen den Gewichtsverlust (und damit gegen die Krankheit) ankämpfen müsse.

Informationen des Behandlungsteams über die Mechanismen bei refraktärer Kachexie und die geringen Aussichten, den Gewichtsverlust noch zu verhindern, können den Patienten spürbar entlasten. Wird die Unmöglichkeit der Verwertung der Nahrung akzeptiert, können Essen und Trinken eine andere Bewertung erfahren. Es geht nun mehr um Geschmack und sinnliches Erleben, und Lieblings Speisen oder Getränke können Genuss liefern und sind nicht nur ein Mittel zur Kalorienzufuhr. Eine Ernährungsberatung ist in vielen Fällen hilfreich, um mit dem Patienten auch in solchen Fällen Mittel und Wege zu finden, Essen und Trinken zu genießen, wenn die Nahrungsaufnahme erkrankungsbedingt erschwert ist, z. B. bei Tumoren im Kopf- und Halsbereich oder bei neurologischen Erkrankungen mit Schluckstörungen.

4. Entscheidungsfindung

Der Umgang mit Appetitmangel und Gewichtsverlust ist ein gutes Beispiel, dass die Vor- und Nachteile der vorhandenen Therapiemöglichkeiten mit den individuellen Prioritäten und Präferenzen des einzelnen Patienten abgeglichen werden müssen, bevor eine Behandlung zu diesen individuellen Therapiezielen geplant werden kann.

Dieser Abgleich ist zu allen Aspekten der Behandlung notwendig. Insbesondere die Frage, wie weit kausale Therapieverfahren gegen die Grunderkrankung noch eingesetzt oder wann sie beendet werden sollen, ist für die meisten Patienten nicht einfach zu entscheiden und wird auch nicht unwesentlich durch die Voreinstellungen und Haltungen im Behandlungsteam mit beeinflusst.

Im Unterricht für Medizinstudenten und Ärzte setze ich folgendes Fallbeispiel ein: Der 69-jährige Patient leidet unter einem fortgeschrittenen Bronchialkarzinom. Vor kurzem wurden Metastasen in der Leber diagnostiziert. Sein Körpergewicht beträgt 52 kg bei 180 cm Körpergröße. Die letzte Chemotherapie wurde wegen schwerer Nebenwirkungen abgebrochen. Er fragt immer wieder nach einer neuen Chemotherapie: „Man muss doch was machen!“ Er ist gerade neu auf der Palliativstation aufgenommen worden. Der konsiliarisch hinzugezogene Onkologe schätzt, dass eine neue Drittlinienchemotherapie höchstens 7% Aussicht auf Lebensverlängerung hat.

Wie geht man nun als Stationsarzt mit dieser Situation um? Es gibt sicher keine einfache und auch keine eindeutige Lösung. Sowohl für wie auch gegen eine neue Chemotherapie können gute Argumente gefunden werden (Tab. 1).

Die Liste der Argumente kann weiter fortgesetzt werden. Nicht unterschätzt werden darf dabei der Wert von Ambivalenz für den betroffenen Patienten. Aus der Sicht des Behandlungsteams ist es wünschenswert, dass Patienten sich möglichst bald für oder gegen die Chemotherapie (oder andere antineoplastische Interventionen) entscheiden, weil dann klare Absprachen getroffen werden können und viele andere Entscheidungen (z. B. ob eine Entlassung nach Hause erfolgen soll oder ob zusätzliche Nahrungszufuhr sinnvoll ist), die damit im Zusammenhang stehen, dann leicht entschieden werden können. Dieser Druck zur Entscheidung lässt aber völlig außer Acht, dass aus der Sicht des Patienten vielleicht der Verzicht auf eine Entscheidung viel einfacher bzw. viel weniger belastend ist. Auch wenn die letzte Chemotherapie so viele Nebenwirkungen hatte, dass der Patient das nicht noch einmal durchleben möchte, kann er so doch mindestens die Idee aufrechterhalten, dass ja nochmal eine neue Chemotherapie zum Einsatz kommen kann, wenn es ihm

vielleicht in naher Zukunft wieder ein bisschen bessergehen wird. Die Ambivalenz hält ihm alle Möglichkeiten offen und verhindert, dass er mit dem endgültigen Verzicht auf jede weitere Chemotherapie auch ein großes Stück Hoffnung aufgeben muss und sich dem Lebensende plötzlich wieder ein deutliches Stück näher sieht.

Tab. 1 Pro und Kontra Chemotherapie

Pro Chemotherapie	Kontra Chemotherapie
Manche neueren Substanzen für Chemotherapien sind sehr gut verträglich.	Viele Chemotherapien haben massive Nebenwirkungen, die den Patienten sehr belasten können.
Manche neueren Substanzen können gut ambulant verabreicht werden, einige Chemotherapeutika können oral eingenommen werden.	Eine neue Chemotherapie bedeutet, dass der Patient viel Zeit für die Behandlung benötigt, die damit nicht mehr für Familie oder andere persönliche Prioritäten am Lebensende zur Verfügung steht.
7% sind doch deutlich besser als nichts.	Die Chancen sind klein für einen Therapieerfolg.
Für manche Patienten ist auch eine Lebensverlängerung von hoher Bedeutung, wenn z. B. ein bestimmter wichtiger Termin in diesen Zeitraum fällt (Silberhochzeit, Geburtstag, ...).	Allerdings hat der Onkologe diese Zahl auf eine Lebensverlängerung bezogen, nicht auf Heilung! Wie hoch ist die zu erwartende Lebensverlängerung? Manchmal wird in den Studien nur eine Lebensverlängerung von wenigen Wochen erreicht.
Sollte eine Chemotherapie nicht trotzdem angeboten werden, damit der Patient die Hoffnung nicht verliert?	Ist die Aussage aus den Studien überhaupt für den Patienten relevant? Patienten mit Kachexie und/oder Lebermetastasen sind oft aus klinischen Studien ausgeschlossen, und für diese Patienten sind die Erfolgsaussichten dann deutlich schlechter bis nicht vorhanden.
Kann ich eine Chemotherapie überhaupt ablehnen, wenn der Patient darauf besteht?	Allerdings ist auch mit Chemotherapie früher oder später mit einem Verlust der Hoffnung zu rechnen, z. B. wenn der Patient unter der Chemotherapie die weitere Verschlechterung seines Befindens feststellen muss.
	Ohne Indikation darf eine medizinische Intervention (auch eine Chemotherapie) nicht durchgeführt werden. Wenn der Arzt keine Indikation feststellen kann, darf er die Intervention dem Patienten gar nicht anbieten.

Auch an vielen anderen kritischen Punkten im Krankheitsverlauf, an denen Patienten Entscheidungen über den Einsatz oder den Verzicht auf möglicherweise lebensverlängernde Maßnahmen treffen müssen, kommt dieses Dilemma zum Ausdruck. Das Behandlungsteam dringt auf eine klare Entscheidung, der Patient verharrt lieber in der Ambivalenz, damit er sich nicht mit dem Verzicht auf die Maßnahme plötzlich wieder mit der Endgültigkeit des Krankheitsverlaufes konfrontiert sieht.

Bei der Festlegung der Therapieziele hat der Patient immer das Recht, eine aus ärztlicher Sicht sinnvolle Therapie abzulehnen. Dies gilt auch, wenn er durch diesen Verzicht sein eigenes Leben gefährdet. Lebenserhaltende Maßnahmen, sogar die Beatmung bei einem Patienten mit einer neurologischen Erkrankung, der nicht selbst atmen kann, müssen eingestellt werden, wenn der Patient sich dafür entscheidet. Dies „Sterben zulassen“, früher passive Sterbehilfe genannt, ist in Deutschland nicht nur erlaubt, sondern ein Recht des Patienten, das dieser einfordern kann.

5. Kommunikation

Die Notwendigkeit zur Abstimmung von Therapiezielen und in der Entscheidungsfindung zeigt den Stellenwert von Kommunikation in der Palliativversorgung auf. Die Verständigung mit dem Patienten, mit seinen Angehörigen, aber auch unter den Mitarbeitenden im Behandlungsteam ist nicht immer einfach angesichts der Lebenskrisen, in die die Palliativpatienten immer wieder gestürzt werden. Ein typisches Beispiel ist die Vermittlung schlechter Nachrichten (*Breaking Bad News*) an Patienten und Angehörige, z. B. vom Fortschreiten der Tumorerkrankung, neu aufgetretenen Metastasen oder darüber, dass eine Chemotherapie abgebrochen werden muss. Solche Situationen können und werden auch in zunehmendem Maß trainiert. So haben wir an unserer Universitätsklinik als Teil des Pflichtfaches Palliativmedizin auch Kleingruppenübungen mit Simulationspatienten (Schauspieler, die eine Rolle als Palliativpatient eingeübt haben), in denen jeder Medizinstudent zumindest einmal ein solches Gespräch unter Anleitung führen muss. Als kurzer Leitfaden für die Vermittlung schlechter Nachrichten hat sich das Akronym SPIKES bewährt (BAILE et al. 2000). Zunächst sollte das *Setting* stimmen (ruhige Umgebung, Störungen, wenn möglich, vermeiden, Zeitrahmen für das Gespräch klären), dann sollte erfasst werden, was der Patient schon weiß (*Perception*), und ob er jetzt weitere Informationen erhalten möchte (*Invitation*). Dann folgt die Vermittlung der schlechten Botschaft (*Knowledge*). Dabei müssen nicht alle Details und Verästelungen der Information abgeliefert werden, denn die meisten Patienten sind ohnehin eher in einer Schockstarre und können diese Details gar nicht aufnehmen. Der Behandler sollte lieber kurz abwarten und Platz für Gefühle lassen (Emotionen). Zum Abschluss fasst der Behandler noch mal kurz zusammen, um was es geht (*Summary*). SPIKES sollte nicht wie eine Checkliste eingesetzt werden, in der die einzelnen Punkte der Reihe nach abgehakt werden, ist aber eine gute Richtschnur zur Strukturierung des Gesprächs und vor allem zum Gesprächstraining.

Grundsätzlich sollte die Kommunikation mit Patienten und Angehörigen von einem tiefen Respekt gegenüber den Betroffenen geprägt und mit einem echten Interesse an ihren persönlichen Prioritäten und Präferenzen verbunden sein. Nur dann kann es gelingen, dass die Palliativversorgung bei Schwerstkranken und Sterbenden weniger von den Prioritä-

ten der vorhandenen Strukturen geprägt wird, sondern wirklich patientenzentriert zu einer optimalen und individualisierten Versorgung führt.

Für Patienten muss z. B. nicht unbedingt die möglichst vollständige Symptomlinderung im Vordergrund stehen. Andere Ziele, wie beispielsweise schnell nach Hause zurückkehren zu können oder möglichst einen klaren Verstand und volle Konzentrationskraft zu erhalten, können aus Sicht des Patienten wichtiger sein, so dass eine medikamentöse Symptomkontrolle nur soweit gewünscht wird, wie sie diese Ziele nicht gefährdet. Ängste und Barrieren gegen Morphin oder andere Opioide sind weit verbreitet. Für Patienten und Angehörige kann mit der Ankündigung einer Opioidtherapie Angst vor dem baldigen Tod aufkommen, da in der öffentlichen Wahrnehmung Opioide immer noch direkt mit dem Tod assoziiert werden. Solche Ängste sollten vor Therapiebeginn angesprochen und möglichst ausgeräumt werden.

Die Prioritäten des Patienten können auch den üblichen Erwartungen der Behandler widersprechen. Üblicherweise sind Patienten über soziale Interaktionen wie Besuche, Gespräche und auch körperliche Berührungen erfreut. Bei einigen Patienten besteht aber demgegenüber ein klarer Wunsch nach Rückzug und Ruhe, körperliche Berührungen werden dann als störend empfunden. Dies rechtzeitig zu erkennen und auch solche Bedürfnisse zu akzeptieren, die den eigenen Vorstellungen und Werturteilen widersprechen, kann für die Behandler eine Herausforderung sein.

6. Palliativversorgung in Deutschland

Seit Anfang der 1980er Jahre entwickelte sich die Palliativversorgung in Deutschland, angestoßen durch die Arbeit von Cicely SAUNDERS in England, die nach langjähriger Vorlaufzeit 1967 in der Gründung des *St. Christopher's Hospice* in London als erste moderne Einrichtung der Palliativversorgung mündete. Seit den ersten Anfängen ist der Auf- und Ausbau der Palliativversorgung in Deutschland in den letzten 20 Jahren weit vorangekommen.

Die Hospiz- und Palliativversorgung wird in Deutschland auf verschiedenen Ebenen und an verschiedenen Orten angeboten. Die allgemeine Palliativversorgung integriert die Arbeitsweisen und die Methoden der Palliativversorgung in nicht spezialisierte Strukturen. Dies schließt nicht nur grundlegende Maßnahmen zur Symptomkontrolle ein, sondern auch die Kommunikation mit dem Patienten, der Familie und mit anderen Versorgungsanbietern sowie Entscheidungsfindungen und Zielsetzungen gemäß den Prinzipien der Palliativversorgung (RADBRUCH et al. 2009, 2010). Diese Ebene sollte von niedergelassenen Ärzten und dem Personal in Krankenhäusern der Allgemeinversorgung wie auch den ambulanten Pflegediensten und dem Personal in Pflegeheimen erbracht werden.

Behandler, die häufiger in Palliativsituationen involviert sind, z. B. Onkologen oder Geriater, deren Haupttätigkeitsfeld jedoch nicht die Palliativversorgung ist, können eine spezialisierte Weiterbildung auf diesem Gebiet erwerben und dadurch zusätzliche Expertise in der allgemeinen Palliativversorgung anbieten. Auf dieser Ebene können sich diese qualifizierten Ärzte mit anderen Leistungserbringern vernetzen für die besonders qualifizierte und komplexe ambulante palliativmedizinische Versorgung (BQKPMV).³

3 BQKPMV – Besonders qualifizierte und koordinierte palliativ-medizinische Versorgung.

Patienten mit komplexen Problemen und Bedürfnissen bedürfen einer spezialisierten Palliativversorgung. Diese Patienten benötigen ein breites Spektrum an therapeutischen Interventionen zur Symptomkontrolle und zur Bearbeitung von psychologischen, sozialen und spirituellen Problemen.

Spezialisierte Angebote der Palliativversorgung erfordern einen Teamansatz, der ein multiprofessionelles Team mit einer interdisziplinären Arbeitsweise kombiniert. Die Teammitglieder müssen entsprechend in der Palliativversorgung qualifiziert sein und sollten ihren Tätigkeitsschwerpunkt in der Palliativversorgung haben.

Für die spezialisierte Palliativversorgung stehen in Deutschland Palliativstationen und Palliativdienste (zur konsiliarischen Mitbehandlung von Palliativpatienten auf anderen Stationen) in den Krankenhäusern, stationäre Hospize und die spezialisierte ambulante Palliativversorgung (SAPV) zur Verfügung. Eine Übersicht über die Angebote der allgemeinen und der spezialisierten Palliativversorgung bietet der Wegweiser Hospiz- und Palliativversorgung Deutschland (www.wegweiser-hospiz-palliativmedizin.de).

Erleichtert wurde die Entwicklung der Palliativversorgung in Deutschland durch eine Reihe von Änderungen in den gesetzlichen Rahmenbedingungen (CREMER-SCHAEFFER und RADBRUCH 2012, MAETENS et al. 2017).

Tab. 2 Strukturen der Palliativversorgung in Deutschland. Quelle: vgl. NEMETH und ROTTENHOFER 2004

	Palliativversorgung			
	palliativer Versorgungsschutz	spezialisierte Unterstützung für allgemeine Palliativversorgung		spezialisierte Palliativversorgung
akute Versorgung	Krankenhaus	ehrenamtliche Hospizdienste	palliativer Konsildienst	Palliativstation
Langzeitversorgung	Alten- und Pflegeheim		ambulante Palliativteams	stationäres Hospiz
Home Care	niedergelassene (Fach-)Ärzte, ambulante Krankenpflegedienste			Tageshospiz

Die Finanzierung der Behandlung auf Palliativstationen, der konsiliarischen Mitbehandlung auf anderen Stationen im Krankenhaus, in den stationären Hospizen und selbst die Finanzierung der Personalkosten von hauptamtlichen Koordinatoren in den ambulanten Hospizdiensten ist mittlerweile gesichert. Mit dem Gesetz zur Stärkung des Wettbewerbs in der gesetzlichen Krankenversicherung wurde 2007 im Sozialgesetzbuch (SGB) V der gesetzliche Anspruch auf eine ambulante Palliativversorgung verankert. Die flächendeckende Umsetzung ist immer noch nicht erreicht, dennoch sind mittlerweile in vielen Regionen Teams für die SAPV etabliert worden. Gesetzliche Regelungen zur Arzneimittelversorgung von Palliativpatienten im Rahmen der SAPV wurden angepasst, um auch in Notfällen schnelle und umfassende therapeutische Maßnahmen durchführen zu können. Palliativmedizin ist seit 2010 als Pflichtfach ins Medizinstudium aufgenommen worden, so dass mittlerweile jeder neu approbierte Arzt in Deutschland zumindest Grundkenntnisse in der Palliativversorgung haben sollte.

Im Atlas der Palliativversorgung der *Worldwide Hospice and Palliative Care Alliance* (WHPCA) ist Deutschland auf der höchsten Stufe der Versorgung (4b: fortgeschrittene Integration in das Gesundheitswesen) eingestuft, gemeinsam mit den anderen westeuropäischen Ländern (*Worldwide Palliative Care Alliance* 2014). Im internationalen Vergleich zur Qualität des Sterbens (*Quality of Death*) steht Deutschland mittlerweile an siebter Stelle, nach Großbritannien, Australien, Neuseeland, Irland, Belgien und Taiwan (*Economist Intelligence Unit* 2015).

Allerdings gibt es trotz aller Fortschritte immer noch Lücken in der Versorgung. In ländlichen Bereichen, für die Bewohner von Pflegeeinrichtungen oder für Patienten mit anderen unheilbaren Erkrankungen als Tumorerkrankungen ist der Zugang zur Palliativversorgung oft erschwert.

Mit der Charta für die Betreuung Schwerstkranker und Sterbender in Deutschland wurden Handlungsfelder zu fünf Leitsätzen identifiziert, in denen weitere Anstrengungen erforderlich sind, um für jeden Patienten mit Bedarf an einer Palliativversorgung eine angemessene Versorgung zu gewährleisten (*Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin* et al. 2010).

7. Stellungnahme der Leopoldina

Vor diesem Hintergrund der bisherigen Fortschritte, aber auch der noch bestehenden Lücken und Defizite in der Versorgung hat die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2015 eine Stellungnahme zur Palliativversorgung vorgelegt (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* und *Union der deutschen Akademien der Wissenschaften* 2015). Die Stellungnahme basiert auf drei Grundempfehlungen zur Palliativversorgung:

- Eine für ganz Deutschland gleichwertige, einheitliche, flächendeckende und im Gegensatz zur gegenwärtigen Situation für alle Betroffenen zugängliche Versorgung mit hoher Qualität.
- Eine für ganz Deutschland verpflichtende lückenlose Finanzierung der tatsächlichen Kosten einer wissenschaftsbasierten Palliativversorgung in Krankenhäusern, Pflegeeinrichtungen und in der häuslichen Umgebung.
- Eine auf wissenschaftlicher Grundlage beruhende Versorgung aller Betroffenen in Deutschland. Aus diesem Grund ist die Evidenzlage in der Palliativversorgung in Deutschland nachhaltig zu entwickeln.

Die Notwendigkeit der noch nicht ausreichenden wissenschaftlichen Grundlage wird eindrucksvoll durch die S3-Leitlinie Palliativmedizin für Patienten mit einer nicht heilbaren Krebserkrankung (*Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin* 2015), die 2015 für das Leitlinienprogramm der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften und der Deutschen Krebsgesellschaft entwickelt wurde, bestätigt. Die Leitlinie formuliert Empfehlungen zu vier Symptomen (Schmerz, Luftnot, Verstopfung und Depression) und drei Aspekten der Versorgung (Kommunikation, Sterbephase, Versorgungsstrukturen). Von den 217 Empfehlungen in der Leitlinie sind aber nur 100 evidenzbasiert, die übrigen beruhen bei fehlender Studienlage auf dem Konsens der Experten.

In der Stellungnahme der Leopoldina wurde deshalb auch eine Forschungsagenda für die Palliativversorgung formuliert. Die wesentlichen Empfehlungen zur Entwicklung der Evidenzbasis in der Palliativversorgung lauten:

- Entwicklung einer eigenständigen nationalen Palliativstrategie;
- Förderung von spezifischen Methoden und Inhalten interdisziplinärer Palliativversorgungsforschung;
- Förderung von Strukturen interdisziplinärer Palliativversorgungsforschung;
- Einbindung der Betroffenen sowie ihrer Angehörigen in die Entscheidungsfindung zur Gestaltung einer Forschungsagenda.

Relevante Forschungsfragen wurden für elf Bereiche identifiziert, von der biomedizinischen Grundlagenforschung über die medizintechnische Forschung bis zu psychosozialen, spirituellen, rechtlichen und ethischen Fragestellungen. Auch für die klinische Forschung wurde ein Themenkatalog aufgestellt, der u. a. klinische Studienprogramme zur medikamentösen Symptomkontrolle mit Interventionsstudien zu häufigen Symptomen, wie Schmerz, Angst oder Luftnot, und zu selteneren Symptomen, wie Juckreiz, Längsschnittstudien im Krankheitsverlauf oder Interventionen in der Terminalphase umfasst.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat – nicht zuletzt mit Bezug auf die Stellungnahme der Leopoldina – vor kurzem eine Förderung für Forschung in der Palliativversorgung ausgeschrieben. Eine ganze Reihe von Forschungsprojekten laufen derzeit in den verschiedenen deutschen Palliativzentren, und es steht zu hoffen, dass wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der Hospiz- und Palliativversorgung in Deutschland aus diesen Projekten entstehen. Allerdings liegt der Schwerpunkt bei den geförderten Projekten eindeutig auf sozial- und kulturwissenschaftlichen Fragestellungen. Unseres Wissens ist kein Projekt in dieser Förderung zur Symptomkontrolle oder einer anderen Fragestellung aus der klinischen Forschung dabei.

8. Forschung in der Palliativversorgung

Klinische Forschung mit hoher methodologischer Qualität ist auch in der Versorgung von Schwerstkranken und Sterbenden möglich. Vor wenigen Jahren belegte eine bahnbrechende Studie an der Harvard-Universität den Wert der Palliativversorgung. Dort wurde eine Gruppe von Patienten mit Lungenkrebs regelmäßig vom Palliativteam beraten. Im Vergleich zu einer Gruppe von Patienten, die keine solche Beratung erhalten hatten, war die Lebensqualität deutlich höher. Gleichzeitig war die durchschnittliche Überlebenszeit in der vom Palliativteam beratenen Gruppe deutlich höher, obwohl die Patienten weniger Chemotherapien oder andere belastende Behandlungen erhielten. Dies verdeutlicht den Wert einer frühen Einbindung der Palliativversorgung in die Behandlung von Krebspatienten.

8.1 Symptomkontrolle

In Deutschland wird Palliativmedizin im akademischen Bereich langsam etabliert. Mittlerweile gibt es zehn Lehrstühle für Palliativmedizin, was sich auch in einer zunehmenden

Forschungstätigkeit niederschlägt. Dennoch fehlen in vielen Bereichen klinische Studien, speziell zur Symptomkontrolle. Nur zur Schmerzlinderung wurden in den vergangenen Jahren einige wenige Studien durchgeführt.

Gleichzeitig werden immer mehr systematische Übersichtsarbeiten zu palliativmedizinischen Fragestellungen publiziert, die ebenfalls meist nur wenige kontrollierte Studien zu ihrer Fragestellung finden und mehr Forschung zu diesen Fragestellungen einfordern. Eine ganze Reihe solcher Übersichtsarbeiten kommt aus den deutschen Palliativzentren. In unserer Abteilung haben wir in den letzten Jahren systematische Übersichtsarbeiten zur medikamentösen und nichtmedikamentösen Behandlung von Fatigue, zur Ernährung bei Kachexie, zur Behandlung mit Cannabinoiden, zu Nichtopioid-Analgetika und zur Wirkung von Biographiearbeit erstellt.

Klinische Studien mit Patienten in der Palliativversorgung sind sicher nicht einfach durchzuführen. Die Patienten sind oft kognitiv und körperlich kaum belastbar, der Zustand kann sich in kurzer Zeit deutlich verschlechtern, oft treten Komplikationen und Begleiterkrankungen auf, so dass die Bewertung des Behandlungserfolges kaum möglich ist. Auch sind die Patientenzahlen selbst in den spezialisierten Einrichtungen zu gering, um große Studien zu einzelnen Symptomen durchzuführen, und die Kapazitäten der Palliativzentren an den Universitätskliniken zu knapp, um sich an mehreren Multicenter-Studien zu beteiligen. Ergänzend werden daher in der Forschungsagenda der Leopoldina ein Bedarf zur methodologischen Entwicklung festgestellt sowie die Einwicklung und Überprüfung von innovativen Forschungsmethoden vorgeschlagen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat – nicht zuletzt mit Bezug auf die Stellungnahme der Leopoldina – vor kurzem eine Förderung für Forschung in der Palliativversorgung ausgeschrieben. Eine ganze Reihe von Forschungsprojekten laufen gerade in den verschiedenen deutschen Palliativzentren an, und es steht zu hoffen, dass wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung der Hospiz- und Palliativversorgung in Deutschland aus diesen Projekten entstehen. Allerdings liegt der Schwerpunkt bei den geförderten Projekten eindeutig auf sozial- und kulturwissenschaftlichen Fragestellungen. Zur Symptomkontrolle oder einer anderen Fragestellung aus der klinischen Forschung werden keine Projekte gefördert.

Woran liegt dieser Mangel an klinischer Forschung? Einen wesentlichen Teil der Schuld an der Studienarmut trägt das Arzneimittelgesetz, das mit den letzten Novellierungen 2004 und im vergangenen Jahr eine ganze Reihe von Regulierungen eingeführt hat, die es fast unmöglich machen, eine vom Forscher organisierte Studie (*Investigator-initiated Study IIT*) zu planen und durchzuführen.

Früher war es ohne allzu großen Aufwand im Rahmen der klinischen Regelversorgung möglich, mit einer einfachen Randomisierung zwei Medikamente oder Applikationswege zu vergleichen, die ohnehin in der alltäglichen Arbeit eingesetzt wurden. So wurden in der eigenen Arbeitsgruppe subkutane versus intravenöse Morphinapplikation bei Schmerzexazerbationen (ELSNER et al. 2005) oder orales transmuköses Fentanyl versus orales Morphin zur initialen Dosisfindung (MUCKE et al. 2016) untersucht.

Nach dem neuen Arzneimittelrecht wären solche Studien nicht mehr erlaubt. Für einen Medikamentenvergleich muss an unserem Universitätsklinikum nicht nur das Ethikkomitee, der Dekan der Medizinischen Fakultät und das Studienzentrum des Universitätsklinikums eingebunden werden, sondern auch ein Antrag beim Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) eingereicht werden und die Studie bei einem Studienregister

angemeldet werden. Der bürokratische Aufwand ist exponentiell angestiegen, statt eines schmalen Prüfplans ist es jetzt ein ganzer Ordner mit Unterlagen, und selbst eine kleine Studie kann schnell Kosten in Höhe von mehr als 100 000 Euro verursachen.

Während also auf der einen Seite Forderungen nach mehr und besserer Evidenz immer höhergeschraubt werden, verhindern steigende Anforderungen an klinische Prüfungen die Initiierung entsprechender Studien. Dieses Dilemma ist allerdings nicht nur in der Palliativversorgung zu spüren. Auch andere Bereiche der Medizin wie Intensivmedizin oder Pädiatrie leiden unter der Diskrepanz zwischen Anspruch und Wirklichkeit in der klinischen Forschung. Und dies ist nicht auf Deutschland beschränkt, auch aus dem europäischen und außereuropäischem Ausland werden nur wenige klinische Studien publiziert.

Hier sind Lösungen gefragt. Eine Diskussion über neue methodologische Ansätze, aber auch eine Diskussion um die gesetzlichen Regulierungen von *Investigator-initiated Trials* (IIT) ist notwendig. Für die Palliativversorgung wurde zum Beispiel das N=1-Design oder Single-Patient-Design empfohlen (NIKLES et al. 2009, 2011). In einem Studiendesign mit mehrfachem *Crossover* erhält der Patient in mehreren Phasen abwechselnd die Prüfmedikation und das Vergleichsmedikament, aus dem Vergleich der Phasen mit Prüfmedikament und den Phasen mit Vergleichsmedikament kann der Effekt bei diesem Patienten bewertet werden. Verlässliche Aussagen zur Wirkung können dann auch mit geringen Patientenzahlen, die jeweils einen solchen *Single-Patient Trial* durchlaufen haben, getroffen werden.

8.2 Ethische Fragestellungen

Bei vielen Fragestellungen in der Forschung zur Palliativversorgung sind die Methoden der klinischen Forschung aber gar nicht geeignet. Ethische Fragestellungen, z. B. zum Einsatz von Patientenverfügungen oder zum Umgang mit Patienten mit einem Todeswunsch, können nicht in kontrollierten Studien untersucht werden, hier sind quantitative Methoden der sozialwissenschaftlichen Forschung erforderlich.

Wenn Patienten einen Todeswunsch äußern, ist es z. B. für das Behandlungsteam wichtig zu verstehen, was sich dahinter verbirgt. In einer eigenen Studie mit der Methode der *Grounded Theory* konnten wir zeigen, dass Patienten hoffen, dass Ärzte und Pflegende diesen Wunsch respektieren, dass sie aber auch Informationen über Alternativen hören wollten (PESTINGER et al. 2015).

Auch für diese Studien sind hohe Anforderungen an die methodologische Qualität zu stellen. Für die *European Association for Palliative Care* (EAPC) haben wir ein Positionspapier zum Verhältnis von Euthanasie und ärztlich assistiertem Suizid und Palliativversorgung entwickelt (RADBRUCH et al. 2016). Grundlage war ein sorgfältiger Konsensus mit einem mehrstufigen Delphi-Prozess. Zunächst wurden in einer Expertengruppe eine Reihe von Statements entwickelt, die dann in zwei weiteren Runden mit den Vorstandsmitgliedern der europäischen Palliativfachgesellschaften auf Konsens überprüft und entsprechend angepasst wurden. In einer vierten und fünften Runde wurde das überarbeitete Positionspapier dann wieder von der Expertengruppe und zuletzt von den Vorstandsmitgliedern der EAPC endgültig abgestimmt. Die Methodik solcher Konsensprozesse sollte ebenso eindeutig festgelegten Kriterien folgen wie bei kontrollierten klinischen Studien (JUNGER et al. 2017).

9. Ausblick

Nur durch weitere Förderungsmaßnahmen können wir die Forschung in der Palliativmedizin ausbauen und insbesondere klinische Studien zur Symptomkontrolle initiieren und damit langfristig sicherstellen, dass die schwerstkranken und sterbenden Patienten die bestmögliche Palliativversorgung erhalten können. Sehr erfreulich ist die Vielzahl und Vielschichtigkeit neuer Forschungsprojekte, z. B. in dem angelaufenen Förderprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), mit multizentrischen Projekten, mit Fragestellungen zu komplexen Problemen und Interventionen und mit interdisziplinärer Zusammenarbeit.

Neben dem Wandel hin zu einer evidenzbasierten Palliativversorgung ist aber auch ein Wandel in der Gesellschaft notwendig. Sterben und Tod sollten nicht länger ausgegrenzt oder gar tabuisiert werden. Mit dem erfolgreichen Ausbau der Hospiz- und Palliativversorgung besteht sogar die Gefahr, dass damit die Begleitung Sterbender aus der Gesellschaft ausgelagert wird und zu einer Aufgabe für die Experten in den spezialisierten Einrichtungen wird. Keinesfalls dürfen die Palliativstationen und Hospize zu Ghettos für Sterbende werden. Die Begleitung von Schwerstkranken und Sterbenden muss immer auch eine gesellschaftliche Aufgabe sein, Sterben und Tod in den Alltag integriert werden. Die Entwicklung von fürsorglichen Gemeinden (*Caring Communities*) versucht, die Verantwortung für die Versorgung von Palliativpatienten wieder an die lokale und regionale Gemeinschaft zurückzugeben, mit Einbindung von Gemeinden und Kommunalpolitik (KUMAR 2007, WEGLEITNER et al. 2016). „Hospiz macht Schule“ ist ein erfolgreiches Projekt, das seit 2005 von der Bundeshospizakademie durchgeführt wird und in dem geschulte Ehrenamtliche eine Projektwoche in Grundschulklassen zum Themenfeld von Leben, Sterben, Trauer, Trost und Trösten organisieren (www.hospizmachtschule.de).

Mit solchen Projekten werden nicht nur die Schüler in der Klasse erreicht, sondern auch die Lehrer und Eltern, und darüber auch das gesamte Umfeld mit Angehörigen, Freunden und Arbeitskollegen. Mit diesem und ähnlichen Projekten kann der gesellschaftliche Wandel erreicht werden, der den Boden für eine umfassende Akzeptanz und dann auch Umsetzung der Palliativversorgung möglich machen wird.

Literatur

- BAILE, W. F., BUCKMAN, R., LENZI, R., GLOBER, G., BEALE, E. A., and KUDELKA, A. P.: SPIKES – A six-step protocol for delivering bad news: application to the patient with cancer. *Oncologist* 5/4, 302–311 (2000)
- CREMER-SCHAEFFER, P., und RADBRUCH, L.: Palliativversorgung im Blickwinkel gesetzlicher und regulatorischer Vorgaben in Deutschland. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz* 55/2, 231–237 (2012)
- Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin*: S3-Leitlinie Palliativmedizin für Patienten mit einer nicht heilbaren Krebserkrankung. 2015. <http://leitlinienprogramm-onkologie.de/Palliativmedizin.80.0.html> (abgerufen am 7. 8. 2015)
- Deutsche Gesellschaft für Palliativmedizin, Deutscher Hospiz- und Palliativverband und Bundesärztekammer*: Charta zur Betreuung schwerstkranker und sterbender Menschen in Deutschland. 2010. http://www.charta-zur-betreuung-sterbender.de/tl_files/dokumente/Charta-08-09-2010.pdf (abgerufen 16. 10. 2011)
- Economist Intelligence Unit*: The quality of death. Ranking end-of-life care across the world. 2015. <https://www.eiuperspectives.economist.com/healthcare/2015-quality-death-index> (abgerufen 1. 3. 2016)

- ELSNER, F., RADBRUCH, L., LOICK, G., GARTNER, J., and SABATOWSKI, R.: Intravenous versus subcutaneous morphine titration in patients with persisting exacerbation of cancer pain. *Journal of Palliative Medicine* 8/4, 743–50 (2005)
- FEARON, K., STRASSER, F., ANKER, S. D., BOSAEUS, I., BRUERA, E., FAINSINGER, R. L., JATOI, A., LOPRINZI, C., MACDONALD, N., MANTOVANI, G., DAVIS, M., MUSCARITOLI, M., OTTERY, F., RADBRUCH, L., RAVASCO, P., WALSH, D., WILCOCK, A., KAASA, S., and BARACOS, V. E.: Definition and classification of cancer cachexia: an international consensus. *The Lancet Oncology* 12/5, 489–495 (2011)
- JUNGER, S., PAYNE, S. A., BRINE, J., RADBRUCH, L., and BREARLEY, S. G.: Guidance on Conducting and REporting DELphi Studies (CREDES) in palliative care: Recommendations based on a methodological systematic review. *Palliative Medicine* 31/8, 684–706 (2017)
- KUMAR, S. K.: Kerala, India: a regional community-based palliative care model. *Journal of Pain and Symptom Management* 33/5, 623–627 (2007)
- MAETENS, A., BEERNAERT, K., DELIENS, L., AUBRY, R., RADBRUCH, L., and COHEN, J.: Policy measures to support palliative care at home: A cross-country case comparison in three European countries. *Journal of Pain and Symptom Management* 54/4, 523–529 (2017)
- MUCKE, M., CONRAD, R., MARINOVA, M., CUHLS, H., ELSNER, F., ROLKE, R., and RADBRUCH, L.: Dosisfindung zur Behandlung mit transdermaletem Fentanylpflaster: Titration mit oralem, transmukosalem Fentanylcitrat und Morphinsulfat. *Schmerz* 30/6, 560–567 (2016)
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften: Palliativversorgung in Deutschland – Perspektiven für Praxis und Forschung*. 2015. http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_Palliativversorgung_LF_DE.pdf (abgerufen am 30. 5. 2015)
- NEMETH, C., und ROTTENHOFER, I.: Abgestufte Hospiz- und Palliativversorgung in Österreich. Wien: Österreichisches Bundesinstitut für Gesundheitswesen 2004
- NIKLES, J., MITCHELL, G. K., SCHLUTER, P., GOOD, P., HARDY, J., ROWETT, D., SHELBY-JAMES, T., VOHRA, S., and CURROW, D.: Aggregating single patient (n-of-1) trials in populations where recruitment and retention was difficult: the case of palliative care. *Journal of Clinical Epidemiology* 64/5, 471–480 (2011)
- NIKLES, J., MITCHELL, G., WALTERS, J., HARDY, J., GOOD, P., ROWETT, D., SHELBY-JAMES, T., and CURROW, D.: Prioritising drugs for single patient (n-of-1) trials in palliative care. *Palliative Medicine* 23/7, 623–634 (2009)
- PESTINGER, M., STIEL, S., ELSNER, F., WIDDERSHOVEN, G., VOLTZ, R., NAUCK, F., and RADBRUCH, L.: The desire to hasten death: Using Grounded Theory for a better understanding “When perception of time tends to be a slippery slope”. *Palliative Medicine* 29/8, 711–709 (2015)
- PLÖGER, M. M.: MIDOS – Validierung des Minimalen Dokumentationssystems für Palliativpatienten. Vergleichsgruppen mit chronisch kranken und gesunden Probanden (Nachdruck der Dissertation). Bonn: Pallia Med Verlag (2016)
- RADBRUCH, L., LEGET, C., BAHR, P., MULLER-BUSCH, C., ELLERSHAW, J., CONNO, F. DE, VANDEN BERGHE, P., and Board Members of the EAPC: Euthanasia and physician-assisted suicide: A white paper from the European Association for Palliative Care. *Palliative Medicine* 30/2, 104–116 (2016)
- RADBRUCH, L., PAYNE, S., BERCOVITCH, M., CARACENI, A., VLIEGE, T. DE, FIRTH, P., HEGEDUS, K., NABAL, M., RHEBERGEN, A., SCHMIDLIN, E., SJÖGREN, P., TISHELMAN, C., WOOD, C., and CONNO, F. DE: White paper on standards and norms for hospice and palliative care in Europe. Part 1 – Recommendations from the European Association for Palliative Care. *European Journal of Palliative Care* 16, 278–289 (2009)
- RADBRUCH, L., PAYNE, S., BERCOVITCH, M., CARACENI, A., VLIEGE, T. DE, FIRTH, P., HEGEDUS, K., NABAL, M., RHEBERGEN, A., SCHMIDLIN, E., SJÖGREN, P., TISHELMAN, C., WOOD, C., and CONNO, F. DE: White paper on standards and norms for hospice and palliative care in Europe part 2- recommendations from the European Association for Palliative Care. *European Journal of Palliative Care* 17, 22–33 (2010)
- SEPULVEDA, C., MARLIN, A., YOSHIDA, T., and ULLRICH, A.: Palliative care: the World Health Organization’s global perspective. *Journal of Pain and Symptom Management* 24/2, 91–96 (2002)
- STIEL, S., MATTHES, M. E., BERTRAM, L., OSTGATHE, C., ELSNER, F., und RADBRUCH, L.: Validierung der neuen Fassung des Minimalen Dokumentationssystems (MIDOS (2)) für Patienten in der Palliativmedizin: Deutsche Version der Edmonton Symptom Assessment Scale (ESAS). *Schmerz* 24/6, 596–604 (2010)
- WEGLEITNER, K., SCHUCHTER, P., and PRIETH, S.: Caring community in living and dying in Landeck, Tyrol, Austria. In: WEGLEITNER, K., HEIMERL, K., and KELLEHEAR, A. (Eds.): *Compassionate Communities: Case Studies from Britain and Europe*; pp. 105–121. Oxon: Routledge 2016
- World Health Organization: Cancer Pain Relief and Palliative Care*. Report of a WHO Expert Committee. Geneva: *World Health Organization* 1990

Worldwide Palliative Care Alliance: Global Atlas of Palliative Care at the end of life. http://www.who.int/nmh/Global_Atlas_of_Palliative_Care.pdf (2014) (abgerufen am 16. 3. 2015)

ZECH, D. F., GROND, S., LYNCH, J., HERTEL, D., and LEHMANN, K. A.: Validation of World Health Organization guidelines for cancer pain relief: a 10-year prospective study. *Pain* 63, 65–76 (1995)

Prof. Dr. Lukas RADBRUCH
Klinik für Palliativmedizin,
Universitätsklinikum Bonn
Sigmund-Freud-Straße 25
53127 Bonn
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 228 28713495
Fax: +49 228 287 2879080024
E-Mail: Lukas.Radbruch@malteser.org

Statistische Datenanalyse in der Zeit von *Big Data*¹

Thomas LENGAUER ML (Saarbrücken)



¹ Dieser Artikel ist eine Umarbeitung und Aktualisierung des Artikels LENGAUER 2016.

Zusammenfassung

Big Data ist in aller Munde. Der Begriff ruft dabei häufig Emotionen hervor. Zum einen ist er die Basis für viel technologischen Optimismus, meist gerichtet auf neue Business-Modelle oder Vereinfachungen bzw. Wirkungsverstärkungen in unserem privaten und beruflichen Leben. Auf der anderen Seite ist er Grund für dystopische Perspektiven, die zum Beispiel um Durchleuchtung des Individuums und seiner Privatsphäre, übermäßige Optimierung im täglichen Leben sowie Intransparenz von Verfahren zur Entscheidungsunterstützung kreisen.

Die Leopoldina beschäftigt sich in ihrer Wissenschaftlichen Kommission „Digitalisierte Gesellschaft“ auch mit dem Thema der Möglichkeiten und Grenzen der Datenanalyse. Das Thema wurde in einer Tagung im Juli 2017 zur „Wirkung der Digitalisierung auf Mensch und Gesellschaft“ aufgegriffen und wird in zwei Arbeitsgruppen zu „Privatheit und Datenschutz“ sowie „Digitalisierung und Demokratie“ bearbeitet.

In diesem Vortrag untersuchen wir die unterliegende Methodik der Datenanalyse von ihrer wissenschaftlichen Seite. Nach einer kurzen historischen Betrachtung – Datenanalyse ist schon recht alt – diskutieren wir, was Big Data von klassischer Datenanalyse unterscheidet. Wir führen in die unterliegende mathematische Methodik ein und berichten über wissenschaftliche Erfolge. Datenanalyse birgt aber auch Risiken, vor allem dann, wenn man die Analysen nicht sorgfältig aufstellt und ihre Resultate nicht angemessen interpretiert. Und sie hat Grenzen, vor allem, wenn es darum geht, kausale Zusammenhänge abzuleiten.

Wir schließen den Vortrag mit der Darstellung eines Konzeptes, wie sich Datenanalyse und das andere Verfahren der wissenschaftlichen Methode, die Theoriebildung, effektiv ergänzen.

Abstract

Big data is on everyone's lips and often raises emotions. On the one hand, the notion is a basis for much technological optimism, mostly directed towards new business models or simplifications or optimizations in professional and private life. On the other hand, it is a basis for dystopic perspectives, which are targeted, for instance, at profiling of the individual and their privacy space, overarching optimization in daily life and intransparency of decision making.

The Leopoldina is investigating the perspectives and limitations of data analysis in its Standing Committee “Digitalized Society”. The topic was addressed in a conference in July 2017 on the “Impact of Digitalization on the Individual and on Society” and is investigated in two working groups on “Privacy and Data Protection” and “Digitalization and Democracy”.

In this lecture we will look at data analysis from a scientific perspective. After a short historical prolog – data analysis is actually quite old – we discuss what differentiates big data from traditional data analysis. We introduce the underlying mathematical methods and report on scientific successes. But data analysis also harbors risks, especially, if the analyses are not configured carefully and their results are not interpreted appropriately. And there are limits, especially regarding the derivation of causal relationships.

We close the keynote with the presentation of a concept joining data analysis with the other concept that has proven successful in science, namely forming scientific theories.

1. Historie der Datenanalyse

Schon seit langer Zeit lernen wir aus Daten. Der generelle Prozess ist immer der gleiche: In einem ersten Schritt werden in möglichst systematischer Form Daten erhoben. Das kann durch reine Beobachtung des zu untersuchenden Systems geschehen, oder auch in einem kontrollierten Experiment, das systematisch Randbedingungen für die Beobachtungen und gezielte Eingriffe in das System festlegt. In den so erhobenen Daten wird dann in einem zweiten Schritt nach bedeutungsvollen Mustern gesucht. Diesen Prozess nennt man Datenanalyse. Die aufgedeckten Muster werden dann interpretiert; so werden Gesetzmäßigkeiten abgeleitet. Häufig endet der Wissensgenerierungsprozess an dieser Stelle. Im Besten aller Fälle wird jedoch nach Aufdeckung der Gesetzmäßigkeiten in einem dritten Schritt nach kausalen Zusammenhängen gesucht, die die Gesetzmäßigkeiten erklären, d.h. auf fundamentalere Prinzipien zurückführen.

Hinweise auf systematische Sammlung und Analyse finden sich bereits bei den Babyloniern (GRASSHOFF 2012). Betrachten wir an dieser Stelle ein Beispiel, das häufig als eine der ersten systematischen Datenanalysen der Neuzeit angesehen wird. Es geht um die Erkenntnisgewinnung über die Bahnen der Planeten im Sonnensystem und die diesbezüglichen naturwissenschaftlichen Grundlagen. Der Prozess begann mit einer mehrere Jahrzehnte währenden peniblen Aufzeichnung der Koordinaten von Planetenbahnen durch den dänischen Astronomen Tycho BRAHE (1546–1601). Johannes KEPLER (1571–1630), der im letzten Lebensjahr von Tycho BRAHE sein wissenschaftlicher Assistent war, hat nach dessen Tod seine Datensammlung weiter bearbeitet und im Jahr 1627 in den *Tabulae Rudolphinae* (KEPLER 1627, 1619) veröffentlicht. Er widmete sich auch der Datenanalyse. Das Ergebnis waren die drei sogenannten Keplerschen Gesetze, die zu Beginn des 17. Jahrhunderts entstanden² und die der Geometrie der Umlaufbahn eines Planeten sowie den Zusammenhängen zwischen seiner Umlaufgeschwindigkeit und dem Abstand von seinem Zentralgestirn eine mathematische Form geben. Es ist wichtig zu betonen, dass die drei Keplerschen Gesetze keine Erklärung für die gefundenen Formeln liefern. Deswegen sprechen wir im Zusammenhang dieses Aufsatzes lieber von „Gesetzmäßigkeiten“ als von Gesetzen. Der Planet kreist in einer elliptischen Bahn um das Zentralgestirn, das in einem der Brennpunkte der Ellipse liegt. Dabei ist die Umlaufgeschwindigkeit schneller, wenn der Planet sich näher am Zentralgestirn befindet. Die Keplerschen Gesetze sind genaue mathematische Formeln für die Form der Ellipse und die Umlaufgeschwindigkeit des Planeten. KEPLERS Begründung beruhte auf Renaissance-Vorstellungen über Kräfte und Seele, stellte aber einen Versuch zur Physikalisierung der Planetentheorie dar.³ Wie wir im Folgenden sehen werden, ist schon die Auffindung solcher Muster in Daten höchst nützlich und kann in vielen Fällen die Grundlage für nachfolgende Entscheidungen und Strategien bilden. Im Fall der Planetenbahnen fand der Prozess der Wissensgewinnung hier (glücklicherweise und bezeichnend für das Vorgehen in der Wissenschaft) kein Ende. Vielmehr hat Isaac NEWTON (1642–1727) auf der Basis der Keplerschen Gesetze und anderer Beobachtungen sein Gravitationsgesetz abgeleitet und im Jahre 1687 in seinem Werk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*,⁴ kurz *Principia* genannt, veröffentlicht. Das Gravitationsgesetz

2 Siehe vor allem KEPLER 1609.

3 STEPHENSON 1987, S. 216.

4 NEWTON 1687, S. 8, 383, 400–510, 381.

stellt eine fundamentale „Neuerklärung“ der Keplerschen Gesetze dar. Genauer gesagt lassen sich die Keplerschen Gesetze aus dem Newtonschen Gravitationsgesetz mathematisch herleiten. Das Newtonsche Gravitationsgesetz stellte in der Nachfolge die axiomatische Grundlage für die Himmelsmechanik dar. Das heißt, es wurde aus der Newtonschen Perspektive als gegeben und nicht weiter erklärungsbedürftig angenommen. Diese Lage hat sich erst mit der Entwicklung der umfassenderen allgemeinen Relativitätstheorie im Jahre 1915 durch Albert EINSTEIN (1879–1955) geändert (EINSTEIN 1916, 2009), aus der sich nun wiederum das Newtonsche Gravitationsgesetz (als Grenzfall für langsame Geschwindigkeit im Verhältnis zur Lichtgeschwindigkeit und schwachen Gravitation) ableiten lässt.

Ein Charakteristikum der eben besprochenen Datenanalyse ist, dass das untersuchte System, hier das Sonnensystem, nur beobachtet wird. Es wird nicht in das System eingegriffen. (Das ist beim Sonnensystem auch nicht möglich.) Zunächst werden wir diese Art der Datenanalyse diskutieren. Wenn man in das System eingreift, etwa in einem kontrollierten Experiment, gewinnt die Datenanalyse einen anderen Charakter, auf den noch eingegangen wird.

2. Was ist anders bei *Big Data*?

Der in Abschnitt 1 geschilderte Prozess ist ein Paradebeispiel für akkurat durchgeführte Datenanalyse, aber als Tabellenwerk mit insgesamt etwas über 250 Seiten sicher nicht für *Big Data*. Bezeichnender als der Umfang der Datensammlung ist die Tatsache, dass die relevanten Muster, mathematisch formuliert in den Keplerschen Gesetzen, manuell von Johannes KEPLER durch Sichtung der Datensammlung abgeleitet werden konnten. Die Datensammlungen, die heutigen *Big-Data*-Analysen zugrunde liegen, sind zum einen wesentlich umfangreicher. Zum anderen sind die in ihnen enthaltenen Muster häufig sehr komplexer Natur. Aus diesen beiden Gründen ist die Auffindung relevanter Muster in solchen Datenbeständen ohne Zuhilfenahme ausgeklügelter Algorithmen und den Einsatz von Computern praktisch nicht mehr möglich.

In teilweiser Abweichung von den Kriterien, die landläufig für *Big Data* genannt werden,⁵ möchte ich hier folgende Vorbedingungen für *Big-Data*-Sammlungen und -Analysen nennen.

- (1.) Das Datenaufkommen muss sehr groß sein. Ich verlange hier nicht die Größe von Petabytes oder mehr, die häufig für den Begriff *Big Data* ins Feld geführt wird. Für die Zwecke dieses Aufsatzes reicht es, eine Größe anzunehmen, die eine Datenanalyse mithilfe komplexer Computeralgorithmen erfordert.
- (2.) Die Datenanalyse muss der Engpass bei der Wissensgenerierung sein, nicht die Datengenerierung. Es ist ein Charakteristikum von *Big-Data*-Analysen, dass uns umfangreiche Mengen von Daten mit vergleichsweise geringem Aufwand zur Verfügung

5 Häufig wird *Big Data* durch die fünf V charakterisiert: *Volume* (große Datenmenge, entsprechend unserem Kriterium [1.]), *Velocity* (Schnelligkeit der Datengenerierung, entsprechend unserem Kriterium [2.]), *Variety* (Heterogenität von Daten, d. h. unterschiedlicher Ursprung; dieses Kriterium steht in unserer Betrachtung nicht im Vordergrund), *Veracity* (Zuverlässigkeit von Daten; siehe Abschnitt 5), *Value* (ein ökonomisches Kriterium, das wir hier nicht betrachten).

stehen. Dies bedeutet eine Umkehrung gegenüber der traditionellen Situation, bei der in der Regel die Datengenerierung wesentlich komplexer und teurer ist als die Datenanalyse. Dies war definitiv im Fall von Tycho BRAHE so. Heute dagegen fallen uns Daten über Hochdurchsatzexperimente in der Wissenschaft und über das Internet im täglichen Leben in einem Umfang zu, den man als lawinenartig bezeichnen kann. Damit wird die Datenanalyse zum Engpass des Prozesses der Wissensgenerierung.

- (3.) Datenanalyse ist von Hand nicht mehr möglich. Dies trifft auf das oben genannte Beispiel der Ableitung der Himmelsmechanik nicht zu. Die Schwierigkeit der manuellen Datenanalyse begründet sich meistens nicht nur im hohen Datenaufkommen, sondern auch in einem weiteren Charakteristikum heutiger Datensammlungen, nämlich der hohen Dimensionalität der Daten. Was das bedeutet, wird im nächsten Abschnitt erklärt.
- (4.) Durch mächtige statistische Verfahren, die man häufig auch als *Data Mining* oder maschinelles Lernen bezeichnet, sind mit Hilfe des Computers auch komplexe Muster in den Daten auffindbar. Damit ist die Anwendung statistischer Verfahren der wesentliche Schritt der Wissensgenerierung bei *Big Data*.

Big Data begegnet uns heute in allen Bereichen des Lebens und der Wissenschaft. Im täglichen Leben finden seit der Entstehung des Internets und durch die zunehmende Vernetzung der Technologien massive Datensammlungen in den verschiedensten Bereichen statt. Daten werden gesammelt, wenn immer wir mit unserem Rechner ins Internet gehen, wenn wir fernsehen, wenn wir Auto fahren, wenn wir unser Handy benutzen, wenn wir Bankgeschäfte betreiben oder einkaufen. Im öffentlichen Leben werden unsere Spuren von Webcams erfasst. Haushaltsgeräte enthalten zunehmend vernetzte Intelligenz, und Vernetzung und Datensammlung setzen sich auch bei der Energieversorgung durch.

Desgleichen ist *Big Data* zunehmend ein wesentlicher Bestandteil von praktisch allen Wissenschaftsdisziplinen. Die Elementarteilchenphysik ist ein Paradebeispiel. Das Higgs-Teilchen wurde nur durch Erhebung und Analyse von Unmengen von Daten gefunden (CHATRCHYAN et al. 2012, HORVÁTH und CMS Collaboration 2014). In der Astronomie werden detaillierte dreidimensionale (manchmal auch vierdimensionale) Modelle des gesamten Universums und der in ihm enthaltenen Sterne und Galaxien entwickelt (IVEZIĆ et al. 2012). Die Geo- und Umweltwissenschaften (VITOLO et al. 2015, SELLARS et al. 2013, GUO et al. 2015) sammeln eine Vielzahl von Daten über diverse Aspekte des Zustandes unseres Planeten und projizieren diese Daten in die Zukunft und in die Vergangenheit. In der Chemie werden sowohl umfassende Datenbanken über chemische Verbindungen und deren Eigenschaften gesammelt als auch durch quantenmechanische Berechnungen entstehende umfassende Datensätze weltweit zugänglich gemacht (GHIRINGHELLI et al. 2015, LUSHER et al. 2014, RAJAN 2015). Die Wirtschafts- und Sozialwissenschaften legen ihren Untersuchungen umfangreiche und vielseitige Datensammlungen zu Grunde (HESSE et al. 2015, LEVIN und EINAV 2014). Und der Zugang zu vollständiger genomischer Information war eine wesentliche Voraussetzung für die Wandlung von Biologie und Medizin zu in hohem Maße durch molekulare Daten getriebenen quantitativen Wissenschaften (PENNISI 2010, The ENCODE Project Consortium 2012).

Über *Big Data* ist schon viel gesagt und geschrieben worden. Wir wollen uns auf einen besonderen wissenschaftsrelevanten Aspekt von *Big-Data*-Analysen konzentrieren, nämlich das Spannungsfeld zwischen der Aufdeckung von Gesetzmäßigkeiten (Assoziationen), die Muster beschreiben, und von Gesetzen (Kausalzusammenhängen), die Muster erklären.

3. Statistische Datenanalyse

In diesem Abschnitt wird kurz in die Grundlagen der statistischen Datenanalyse eingeführt. Wir stellen hier eine bestimmte Variante der Datenanalyse, das sogenannte überwachte Lernen, vor. Diese Form der Datenanalyse zielt auf die Vorhersage von unbekanntem Werten aus einer Reihe von bekannten Werten über ein Objekt oder einen Prozess. Die Kodierung der Eingabe ergibt gewöhnlich für jeden Datenpunkt einen Punkt in einem in der Regel hochdimensionalen euklidischen Raum. Wir verwenden zur Veranschaulichung hier einen Beispieldatensatz,⁶ der Auskunft über den Spritverbrauch von Kraftfahrzeugen sowie deren Baujahr und Gewicht gibt. Alle drei Werte zusammen bilden einen Datenpunkt, der Informationen über ein Fahrzeug liefert. Hierbei sehen wir die letzteren beiden Werte als Eingaben an und den ersten Wert als Ausgabe. Diese Rollen der Werte werden in der Datenanalyse festgelegt und sind nicht im Datensatz verankert. Wir verteilen sie so, weil wir die Abhängigkeit des Spritverbrauchs von Gewicht und Baujahr des Fahrzeugs analysieren wollen. Da die Daten aus den USA stammen, ist der Spritverbrauch in Meilen pro Gallone (mpg) und das Gewicht in englischen Pfund (lbs) angegeben. Wir haben also zwei Eingaben (Gewicht und Jahr) – der der Analyse zugrundeliegende Datenraum ist damit zweidimensional – und eine Ausgabe (Spritverbrauch). In realen Fällen kann die Anzahl der Dimensionen des Datenraums durchaus sehr viel höher sein. Darauf gehen wir noch ein.

Grundsätzlich gibt es zwei Formen des überwachten Lernens (siehe Abb. 1):

- (1.) Regression: Hier weisen wir jedem Datenpunkt eine Zahl (Markierung, Label) als Ausgabe zu. Bei unserem Beispieldatensatz ist diese Zahl eine Schätzung des Spritverbrauchs in Meilen pro Gallone. Wir haben es mit zwei Eingabevariablen zu tun (Gewicht, Jahr), die eine Ebene aufspannen, über die sich eine senkrechte Achse erhebt, die die Markierung „Verbrauch“ trägt. Die mittels eines mathematischen Modells geschätzten Verbrauchswerte sind in Abbildung 1 (*A*, *B*) durch Oberflächen dargestellt. Die tatsächlichen (gemessenen) Werte umgeben diese Fläche als Punktwolke. Abbildung 1 (*A*) zeigt ein lineares Modell, dargestellt durch eine nicht gekrümmte Ebene. Abbildung 1 (*B*) zeigt ein komplexeres nichtlineares Modell, dargestellt durch eine (leicht) gekrümmte Ebene. Die senkrechten Linien, die von den Datenpunkten auf die Oberflächen gezogen sind, repräsentieren die Fehler, die das Modell bei der Schätzung der einzelnen Verbrauchswerte macht. In beiden Fällen sind die Ebenen so positioniert, dass die Summe der Fehlerquadrate über alle Messpunkte im Datensatz minimiert wird. Der Fehler des linearen Modells ist größer als der des nichtlinearen Modells, da das lineare Modell die zusätzliche Randbedingung erfüllen muss, dass die Ebene nicht gekrümmt sein darf.
- (2.) Klassifikation: Anstatt einen kontinuierlichen Wert als Ausgabe zu schätzen, weisen wir hier jedem Datenpunkt eine von endlich vielen Klassen zu. Die Anzahl der Klassen ist in der Regel klein. Im Beispiel von Abbildung 1 (*C*, *D*, *E*) haben wir zwei Klassen gewählt. Die Autos werden in die Klassen „niedriger Verbrauch“ ($\text{mpg} \geq 20$, blau) und „hoher Verbrauch“ ($\text{mpg} < 20$, orange) eingeteilt. Abbildung 1 (*C*) zeigt diese Situation in derselben Darstellung wie Abbildung 1 (*A*, *B*)

⁶ Der Datensatz ist unter <http://www-bcf.usc.edu/~gareth/ISL/data.html> zugänglich.

für die Regression. Abbildungen 1 (*D*, *E*) zeigen Aufsichten auf die Ebene der Eingabedaten. Die Blickrichtung ist hier durch den Pfeil in Abbildung 1 (*C*) gegeben. Das Ziel der Datenanalyse ist, den Eingabe-Datenraum – hier also die Ebene – in Bereiche einzuteilen, die den Klassen zugeordnet werden. Die Klassifikation eines neuen Datenpunktes geschieht dann durch die Zuordnung der Farbe des Bereiches, in dem der Punkt liegt. Abbildung 1 (*D*) zeigt wiederum ein lineares Modell, das durch eine nicht gekrümmte Trennlinie der Klassenbereiche, die Entscheidungsgrenze, gekennzeichnet ist. Das Modell macht auf unserer Datenmenge eine Anzahl von Fehlern (30 aus 392), die durch Punkte gegeben sind, deren Farbe – also ihre tatsächliche Klasse – nicht mit der ihres Hintergrunds – also der geschätzten Klasse – übereinstimmt. Die Trennlinie ist so gewählt, dass die Anzahl solcher falscher Klassifizierungen möglichst klein wird. Abbildung 1 (*E*) zeigt ein nichtlineares Modell mit einer komplexen gekrümmten Linie. Ähnlich wie im Falle der Regression sind die Vorhersagen auf unserer Datenmenge besser. Bei der Regression liegen sie im Schnitt näher an den wahren Werten, bei der Klassifikation macht dieses Modell wesentlich weniger Fehler auf unserer Datenmenge (2 aus 392).

Die Kunst der problemgerechten Datenanalyse besteht nun in (1.) der geeigneten Kodierung der Eingabe, (2.) der richtigen Auswahl der Fehlerfunktion (in unserem Fall dem quadratischen Fehler bei der Regression und der Anzahl der falschen Klassifikationen bei der Klassifikation) und (3.) der geeigneten Auswahl des Modells, etwa der richtigen Entscheidung zwischen einem linearen (einfachen) und einem nichtlinearen (komplexen) Modell. Dabei haben einfache Modelle den Nachteil, dass sie die gegebenen Daten unter Umständen nicht mit hoher Genauigkeit wiedergeben. Wenn ein Modell zu komplex ist, dann besteht dagegen die Gefahr, dass es zwar die gegebenen Daten sehr genau wiedergibt, aber nicht hinreichend auf zukünftige Daten verallgemeinert. Ein solches Modell nennt man übertrainiert. Abbildung 1 (*E*) zeigt ein Beispiel eines übertrainierten Modells für den Beispieldatensatz. Dass dieses Modell übertrainiert ist, ist leicht an den komplexen Klassengrenzen zu erkennen, die ganz offensichtlich auf die spezifisch gegebene Datenmenge angepasst sind und nicht die wirkliche Beziehung zwischen hohem bzw. niedrigem Verbrauch und Baujahr sowie Gewicht wiedergeben. Das Modell macht deshalb nur wenige Fehler auf den gegebenen Daten. Es ist aber nicht zu erwarten, dass das Modell auf zukünftigen Daten genaue Aussagen macht. Schließlich hängt der Spritverbrauch eines Kraftfahrzeugs auch von anderen Größen als seinem Gewicht und Baujahr ab. Solche Daten stehen uns aber nicht zur Verfügung. Daher ist davon auszugehen, dass das nichtlineare Klassifikationsmodell aus Abbildung 1 (*E*) auf neuen Daten erhebliche Fehler macht. Allerdings ist ein lineares Modell für die Beziehung zwischen Gewicht und Baujahr auf der einen Seite und Verbrauch auf der anderen Seite offenbar zu einfach: Wie sich zeigen lässt, gibt das nichtlineare Regressionsmodell in Abbildung 1 (*B*) den Zusammenhang auch auf zukünftigen Daten besser (mit geringerem Fehler und höherer Vorhersagekraft) wieder als das lineare Modell in Abbildung 1 (*A*). Und im Vergleich zum nichtlinearen Klassifikationsmodell ist das nichtlineare Regressionsmodell wesentlich „glatter“ und bietet eine plausible funktionale Abhängigkeit des Verbrauchs von Gewicht und Baujahr. Wir sehen also, dass Modelle zu einfach, aber auch zu komplex sein können. Die geeignete Wahl der Modellkomplexität ist ein zentrales Problem bei der Datenanalyse.

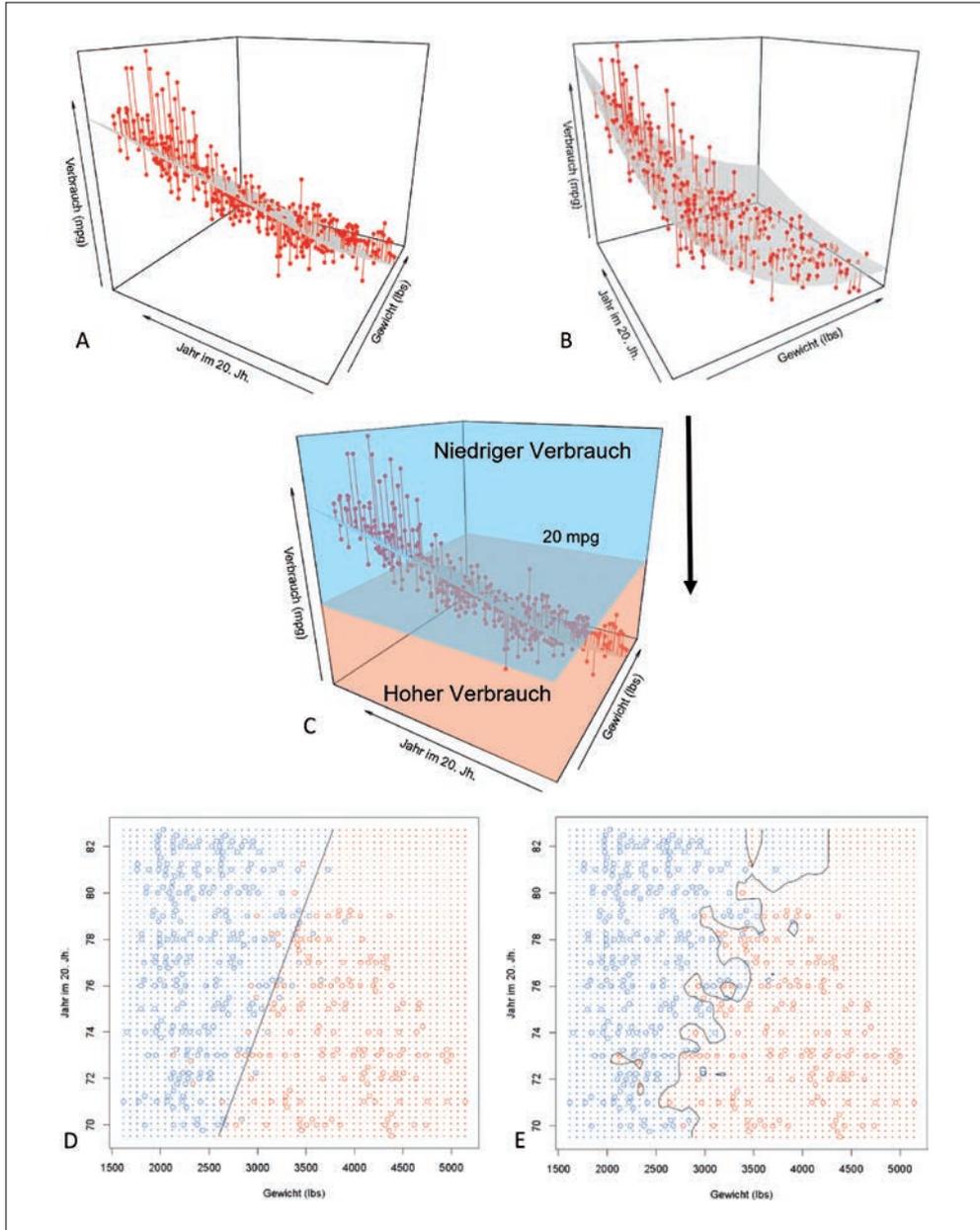


Abb. 1 Statistische Verfahren zur Datenanalyse. (A) Regression, lineares Modell, (B) Regression, nichtlineares Modell. Die Datenpunkte sind rot gefärbt. Die grauen Oberflächen repräsentieren die geschätzten Verbrauchswerte. Die senkrechten roten Linien geben die Abweichungen der tatsächlichen von den geschätzten Werten an. (C) Klassendefinition bei binärer Klassifikation in Hoch- und Niedrigverbrauch. (D) Klassifikation, lineares Modell. (E) Klassifikation, nichtlineares Modell. Die Datenpunkte sind blau (niedriger Verbrauch) bzw. orange (hoher Verbrauch) eingefärbt. Die schwarzen Linien zeigen die mit je einem linearen bzw. nichtlinearen Verfahren abgeleiteten Klassengrenzen. Die Blickrichtung der Aufsicht auf die Eingabeebene in Abb. (D) und (E) ist durch den senkrechten Pfeil in Abb. (C) gegeben.

Ein anderes wesentliches Problem bei der Datenanalyse stellt die häufig hohe Dimensionalität der Daten dar. Darunter versteht man die Anzahl der Merkmale, die für jeden Datenpunkt vorliegen. In unserem Beispiel haben wir zwei Merkmale: Gewicht und Baujahr; der Datensatz ist zweidimensional. Ferner haben wir 392 Datenpunkte. Die Anzahl der Datenpunkte übersteigt also die Dimensionalität des Datenraums deutlich. Das führt dazu, dass der Datenraum auch gut mit Datenpunkten gefüllt ist, wie in Abbildung 1 (D) und 1 (E) besonders gut zu sehen ist. Nur in der oberen rechten Ecke fehlen uns Datenpunkte. Bei den Datensätzen heutiger Prägung ist dies häufig ganz anders. Wollen wir z. B. den Einfluss von Genen auf Krankheitsbilder analysieren, so haben wir es oft mit vergleichsweise wenigen Datenpunkten zu tun. Jeder Datenpunkt repräsentiert einen Patienten, und die Kohortengrößen liegen meistens im Bereich von wenigen Dutzend bis zu Hunderten. (Einige sehr große Studien umfassen allerdings auch heute schon über 100 000 Patienten; MICHAILIDOU et al. 2015, MAROULI et al. 2017, VISSCHER et al. 2017.) Der Mensch hat aber etwa 20 000 Gene, die mit modernen molekularbiologischen Methoden alle vermessen werden können. Die Dimensionalität des Datensatzes liegt also ebenfalls in diesem Bereich. Damit übersteigt die Dimensionalität des Datenraumes bei weitem die Anzahl der Beobachtungen. Dies ist in vielen Fällen aus allen Bereichen der Datensammlung so. Bei einem hochdimensionalen Datensatz gibt es zweierlei Probleme, die in Abbildung 2 illustriert werden.

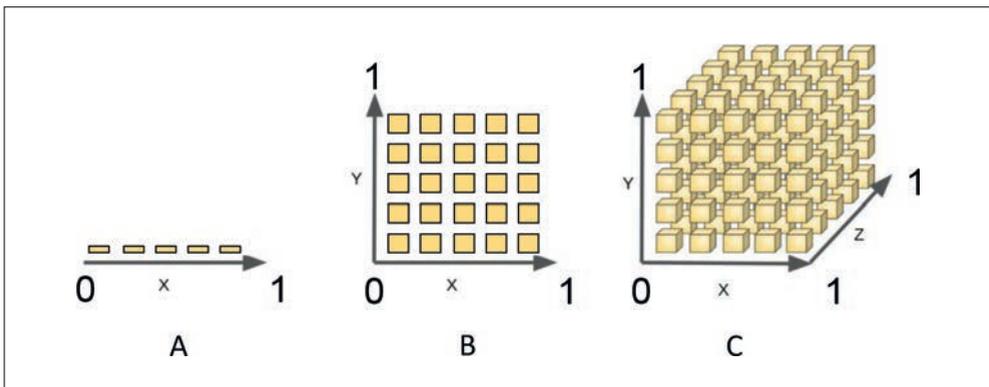


Abb. 2 (A) Eindimensionaler Datenraum. Fünf gleich verteilte Datenpunkte füllen den Raum zu einer bestimmten Dichte. Zwei dieser Punkte, also 40%, liegen am Rande des Datenraumes. (B) Zweidimensionaler Datenraum. Um ihn zu der gleichen Dichte mit Datenpunkten zu füllen, braucht man 25 Punkte. Davon liegen 16 Punkte, also 64%, am Rand. (C) Dreidimensionaler Datenraum. Jetzt werden schon 125 Datenpunkte benötigt. Davon liegen 98 Punkte, also 78,4%, am Rand.⁷

Mit steigender Dimensionalität wächst die Anzahl der Datenpunkte, die benötigt werden, um den Raum zu einer bestimmten Dichte zu füllen, exponentiell. Für Räume mit hundert oder tausenden von Dimensionen stehen in der Regel nicht annähernd genug Datenpunkte zur Verfügung, um den Raum angemessen zu erfassen. Ferner befindet sich mit wachsender Dimensionalität ein immer größerer Anteil der Datenpunkte am Rande des

⁷ Diese Abbildung ist eine Abwandlung einer Abbildung auf <https://medium.freecodecamp.org/the-curse-of-dimensionality-how-we-can-save-big-data-from-itself-d9fa0f872335>.

Raumes, also in einer ungünstigen Lage für alle Verfahren, die aus den Informationen über Punkte in der Nachbarschaft des untersuchten Datenpunktes auf den Ausgabewert am untersuchten Punkt schließen lassen. Hochdimensionale Räume bestehen praktisch nur aus Rand. Wenn die Anzahl der Dimensionen die Anzahl der Datenpunkte übersteigt, haben wir in der Regel ein ernsthaftes Problem, und ein erheblicher Anteil der heutigen Forschung zielt darauf ab, in diesen Fällen dennoch zu brauchbaren Vorhersagen zu kommen.

Nach einer Beschreibung der Methoden der Datenanalyse kommen wir nun zu einem Fallbeispiel, das zeigt, dass die Analyse von großen Datensätzen wertvolle Informationen liefern kann, die anderweitig nicht verfügbar wären.

4. Medizin: *Big Data* zum Wohl des Patienten

Die Medizin als Wissenschaft beschäftigt sich mit den Unterschieden zwischen gesunden und kranken Menschen. Krankheiten haben in aller Regel eine konkrete molekulare Grundlage. Sie manifestieren sich in Deregulierungen von hochkomplexen molekularen Wechselwirkungsnetzen in oder zwischen Zellen unseres Körpers. Alle diese Wechselwirkungen unterliegen den heute wohlbekannten Naturgesetzen der Physik und Chemie. Im Prinzip kennen wir also die mathematischen Zusammenhänge, die den Funktionen und Fehlfunktionen des menschlichen Körpers zugrunde liegen. Eine physikochemische Analyse der molekularen Grundlagen auf Basis der Anwendung der uns bekannten Naturgesetze ist jedoch in aller Regel nicht möglich. Das liegt daran, dass die beteiligten Systeme (Moleküle, Zellen, Organe, Organsysteme) um ein Vielfaches zu komplex dafür sind. Das heißt, wir müssen datengetrieben vorgehen. Dies ist an sich nichts Neues. Medizin war schon immer datengetrieben. Der Arzt hat seine Diagnose und Therapie aus einer Sammlung von Informationen über die Krankheitsgeschichte des Patienten, aus Laborwerten und aus seiner beruflichen Erfahrung, u. a. basierend auf früheren Krankheitsfällen, abgeleitet. In gewisser Weise hat er auf der Basis der ihm zur Verfügung stehenden Informationen ein Modell des Patienten abgeleitet, auf dessen Basis er diagnostische und therapeutische Entscheidungen trifft. Jedoch sind in der Regel weder das Modell noch der Prozess seiner Ableitung durchgängig systematischer Natur. Im Zeitalter von *Big Data* erfährt diese Vorgehensweise jetzt ein hohes Maß an Mathematisierung und Systematisierung. Dabei gewinnt der Aspekt der gemessenen Laborwerte, insbesondere solcher mit genomischem Charakter, und ihrer mathematischen Interpretation mit Computerhilfe zunehmende Bedeutung.

Wir illustrieren dies am Beispiel der HIV-Therapie. Das Humane Immundefizienz-Virus (HIV) verändert sich im Körper des infizierten Patienten äußerst schnell. Hier läuft dieselbe Art von Prozess ab, die wir auch von der Entwicklung von Antibiotikaresistenz bei Bakterien kennen. Nur können wir ihn in diesem Fall nicht nur in der Gesamtheit aller Infizierten, sondern auch im einzelnen Patienten und über wesentlich kürzere Zeiträume beobachten, nämlich über Tage, Wochen oder Monate. Ein HIV-Patient beherbergt eine ganze Vielfalt von ähnlichen, aber unterschiedlichen HI-Viren, und diese Viren verändern sich ständig, um den Angriffen des Immunsystems des Patienten und der bestehenden Medikamententherapie zu entgehen. Aus diesem Grund gibt es heute über zwei Dutzend verschiedene Medikamente gegen HIV, die dem Patienten in einer Kombination von etwa drei Medikamenten verabreicht werden. Diese Kombination führt zu über tausend möglichen Therapieoptionen. Ob ein Virus resistent gegen ein bestimmtes Medikament ist, ist im viralen Genom kodiert,

allerdings auf eine Art und Weise, die nicht ohne Weiteres für den Menschen ersichtlich und die im Labor auch schwer zu messen ist. Wir haben es also mit einem typischen Datenanalyseproblem zu tun (LENGAUER und KAISER 2009). Die Eingabe für das Problem besteht aus einer angemessenen Kodierung der Genomsequenz des im Patienten vorrangig zu findenden Virus. (Seit neuestem kann man auch die Gesamtheit der im Patienten vorkommenden Viren mit hoher Genauigkeit vermessen [THIELEN und LENGAUER 2012, DÖRING et al. 2018]). Dieser Datenraum hat einige tausend Dimensionen. Die Ausgabe ist eine Liste der geschätzten Resistenzen des Virus gegen das Sortiment der verfügbaren HIV-Medikamente (siehe Abb. 3). Die Datenbank (der *Big-Data*-Aspekt des Problems) besteht in diesem Fall aus einer internationalen Sammlung von Daten über mehr als 170 000 Therapieepisoden von HIV-Patienten (ZAZZI et al. 2012).⁸ Aus diesen Daten werden mit Methoden des statistischen Lernens, wie in Abschnitt 3 beschrieben, mathematische Modelle abgeleitet, die für eine virale Sequenz die Resistenz des Virus gegenüber den verfügbaren Medikamenten schätzen.

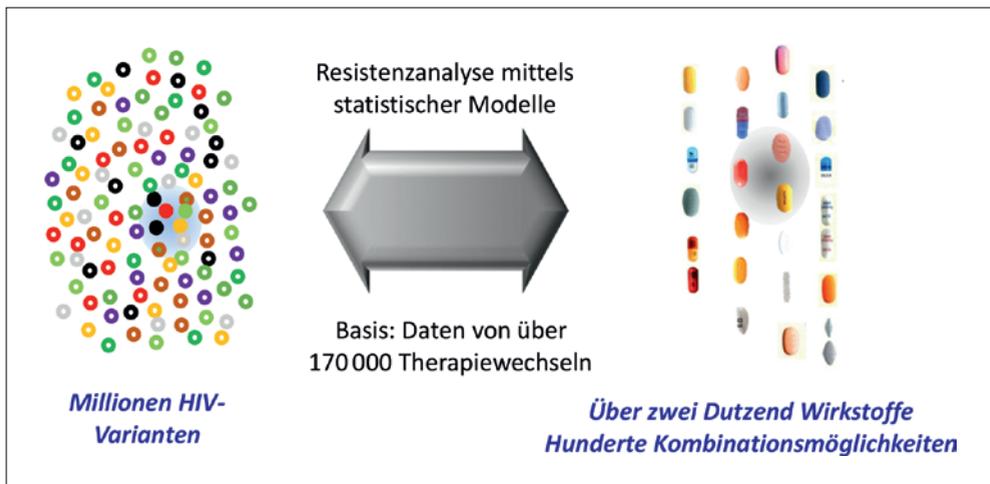


Abb. 3 Mithilfe von *Data Mining* in großen Datenbanken zur Resistenz von HIV gegen Medikamente werden aus einer Menge von über zwei Dutzend HIV-Medikamenten (*rechts*) Medikamentenkombinationen (*grau hinterlegt*) vorgeschlagen, die gegen die im Patienten vorherrschende Population von HI-Viren (*links, blau hinterlegt*) wirksam sind.

Wir stellen ein solches Beratungssystem für die HIV-Therapie unter <http://www.geno2pheno.org/> frei über das Internet zur Verfügung (BEERENWINKEL et al. 2002, LENGAUER und SING 2006). Das System wird über Deutschland hinaus zur Behandlung von HIV-Patienten eingesetzt.

Abbildung 4 zeigt einen von unserem System ausgedruckten Analysebericht aus dem Jahr 2003 für einen HIV-Patienten, der ein Virus mit vielen Resistenzmutationen in sich trägt, für den mit herkömmlichen Methoden keine Theorie gefunden werden konnte. Die Tabelle hat eine Zeile pro Medikament. Die erste Spalte (von links) enthält den Medikamentennamen. Die zweite Spalte enthält die vom Modell berechnete Schätzung des Resis-

⁸ Siehe auch www.euresist.org.

tenzfaktors gegen das entsprechende Medikament, einen numerischen Laborwert, der die Stärke der Resistenz angibt. Um diese Werte zwischen verschiedenen Medikamenten vergleichbar zu machen, enthält die dritte Spalte eine normalisierte Form des Resistenzfaktors (*z-score*). Wenn dieser Wert größer als 4 ist, besteht ein erhebliches Maß an Resistenz des Virus gegen das Medikament, das den Einsatz des Medikaments problematisch erscheinen lässt. Für den betreffenden Patienten gab es nach dieser Maßgabe kein wirksames Medikament mehr. Daher ist es plausibel, dass herkömmliche Methoden, die nur eine Klassifikation des Medikaments in Resistenz/keine Resistenz liefern, keinen Therapieverschlagn zutage förderten.

Unsere Datenanalyse liefert jedoch einen numerischen Wert, und wir könnten nun z. B. eine Therapie vorschlagen, die die Wirkstoffe mit den niedrigsten *z-scores* kombiniert, auch wenn diese etwas über 4 liegen. Es geht jedoch noch besser.

Wir haben unsere Datenanalyse um eine Interpretation der Vorhersage erweitert. Das geht über die in Abschnitt 3 präsentierten Methoden hinaus. Im rechten Teil der Tabelle listen wir die Mutationen im viralen Genom, die dem Virus Resistenz verleihen (Resistenzmutationen, *rot*) bzw. die die Wirksamkeit des Medikaments erhöhen (resensitivierende Mutationen, *grün*). Jede Mutation ist bestimmt durch eine Zahl (die Position der Mutation im entsprechenden Protein des Virus), gefolgt von einem Buchstaben (der Aminosäure, in die das Virusprotein an dieser Position mutiert ist). Damit wird der Resistenzwert des Virus in Bezug zu Merkmalen des Virusgenoms gesetzt. Und das verstärkt die Aussagekraft der Datenanalyse erheblich. Die behandelnden Ärzte haben auf der Basis dieses Berichtes die

Drug	RF(*)	z-score	Scored Mutations(**)
ZDV	257.276	9.945	215Y 210W 41L
ddl	4.057	6.087	184V 121H 178L 215Y 177E
d4T	2.477	4.594	215Y 178L 118I 184V 210W 121H 41L
3TC	149.029	18.504	184V 41L 215Y
ABC	7.501	11.968	184V 215Y 210W 41L
TDF	4.613	6.684	215Y 41L 98G 184V 178L 118I 177E 135T
NVP	149.235	5.243	103N 135T 210W 98G 211K
EFV	60.034	7.450	103N 98G 135T 210W 214F 177E
SQV	3.908	4.658	63P 46I 37N 71V 72T 60E 76V 57K
IDV	52.999	11.171	46I 76V 63P 82A 61E 62V 60E 71V
NFV	33.156	8.246	46I 63P 10F 3I 76V 60E 62V
APV	59.452	13.085	76V 54M 10F 46I 63P
LPV	100.108	14.521	46I 76V 10F 63P 82A
ATV	19.252	7.838	82A 46L 54M 76V 93L 71V 62V

Abb. 4 Analysereport für einen HIV-Patienten

beiden umrandeten Medikamente verabreicht. Das Medikament SQV wurde aufgrund des noch recht geringen Resistenzniveaus des Virus mit der Hoffnung gegeben, dass es noch ausreichend wirkt. LPV kann aufgrund des hohen Resistenzwertes nicht wirken. Aber dieser hohe Wert lässt sich u. a. auf die Resistenzmutation 76V zurückführen, die gleichzeitig das Resistenzniveau des Virus bezüglich SQV senkt. Die Ärzte hofften, dass das Virus im Bestreben, seine Resistenz gegen LPV zu erhalten, an der Mutation 76V festhält, die die Wirksamkeit von SQV unterstützt. Es stellte sich heraus, dass diese Therapie über viele Jahre wirksam war.

Wir können daraus ersehen, dass die Aufgabe einer Datenanalyse über die reine Schätzung des Ausgabewertes hinausgeht. Vielmehr will man auch die Eingabewerte dahin gewichten, wie informativ sie für den Ausgabewert sind.

In der Entwicklung unserer HIV-Modelle haben wir es mit allen in Abschnitt 3 geschilderten Problemen zu tun. Aufgrund der hohen Dimensionalität unseres Datenraums ist die Gefahr des Übertrainierens gegeben. Wir verwenden in der Regel lineare Modelle, zum einen, weil bei ihnen die Gefahr von Übertrainieren gering ist, und zum anderen, weil sie die Art von Interpretation der Schätzung ermöglichen, die wir gerade beschrieben haben.

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass die Art der Erklärung, die wir hier geben, assoziativ und nicht kausal ist. Das ist zu vergleichen mit der Art, wie wir als Menschen Gesichtsausdrücke unserer Mitmenschen interpretieren. Ob sie fröhlich oder traurig, aggressiv oder freundlich sind, schließen wir nicht aus einer Kausalanalyse ihres psychischen Zustandes – dafür haben wir in der Regel gar nicht die hinreichenden Informationen – sondern aus den Assoziationen, die wir im Rahmen unserer umfangreichen Erfahrung mit Gesichtsausdrücken im Laufe unseres Lebens gesammelt haben.

Natürlich machen unsere Modelle auch Fehler. Darum bieten wir in einigen unserer Analysearten auch Zuverlässigkeitsschätzungen an; d. h., wir geben zusätzlich zur Vorhersage der viralen Resistenz auch einen Wert an, aus dem man entnehmen kann, wie sehr der Vorhersage zu trauen ist. Die Vorhersagegenauigkeit unserer Modelle ist in retrospektiven Studien untersucht worden, und eine Reihe von Modellen haben sich als klinisch nützlich erwiesen. Insbesondere bei Therapie-erfahrenen Patienten, die bereits hochresistente Viren in sich tragen, ist eine statistische Datenanalyse wesentlich besser dazu in der Lage, verbleibende vielversprechende Therapieoptionen zu identifizieren, als manuelle Verfahren der Medikamentenauswahl.

5. Risiken und Grenzen bei statistischen Datenanalysen

Im letzten Abschnitt haben wir gesehen, welche Möglichkeiten sich durch die Analyse großer Datensätze ergeben. In diesem Abschnitt wollen wir unsere Diskussion der Datenanalyse noch etwas kritisch vertiefen. Datenanalysen sind nämlich auch mit Risiken behaftet und stoßen an Grenzen.

Beginnen wir mit den Risiken: Betrachten wir dazu ein aktuelles Beispiel aus der modernen genombasierten Medizin, das wir schon im Abschnitt 3 kurz gestreift haben. Hier versucht man, Zusammenhänge zwischen Krankheitsbildern und Genomvarianten des Patienten aufzudecken. Kurz gesagt, man sucht nach Krankheitsgenen. Der Begriff „Krankheitsgen“ ist recht irreführend, denn in der Regel hat jeder Mensch das betreffende Gen.

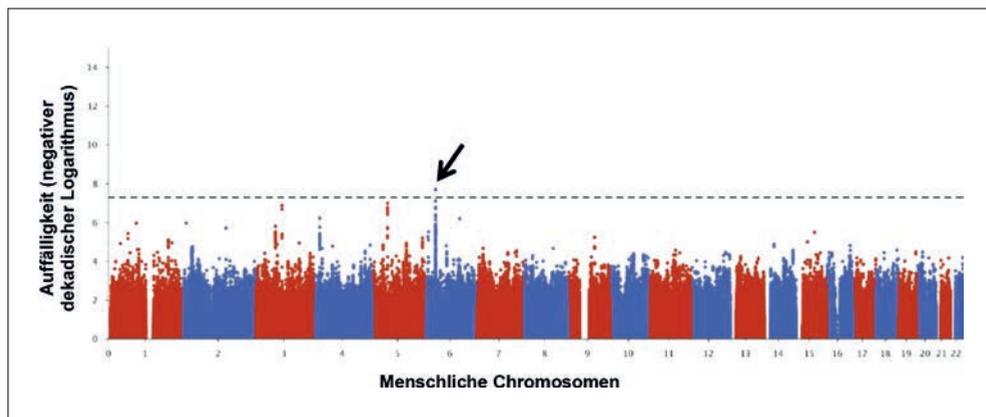


Abb. 5 Ergebnisse einer genomweiten Assoziationsstudie zur Aufdeckung von mit der Intensität der HIV-Infektion assoziierten Genomorten. Nur der mit dem Pfeil gekennzeichnete Genort ist nach Bereinigung der Resultate unter Berücksichtigung des Phänomens des multiplen Testens signifikant mit dem Krankheitsbild assoziiert. Für diesen Genort, an dem ein Protein unseres Immunsystems codiert ist, ist auch die biologische Grundlage dieser Assoziation bekannt. (Abb. adaptiert aus BARTHA et al. 2013, unter *Creative Commons License CC BY 4.0*)

Dabei können sich die Varianten des Gens zwischen verschiedenen Menschen unterscheiden. Nur manche Varianten sind mit Krankheiten assoziiert. Wonach man sucht, sind Varianten von Genen, die beim untersuchten Krankheitsbild gehäuft auftreten. Solche statistischen Zusammenhänge werden mit sogenannten genomweiten Assoziationsstudien (GWAS) untersucht (Abb. 5). Hier bedient man sich einer großen Kohorte von in der Regel tausenden oder zigtausenden Probanden, von denen einige gesund und einige krank sind. Man liest deren Genome bzw. diejenigen Teile des Genoms ab, die man für krankheitsrelevant hält. Und dann untersucht man mit geeigneten statistischen Verfahren, ob an gewissen Orten im Genom (Genorten, Genloci) genomische Varianten unter den Patienten mit einem bestimmten Krankheitsbild gehäuft auftreten. Mit GWAS hat man schon vielfache Hinweise auf die Assoziationen von Genorten zu Krankheitsbildern gefunden (*Wellcome Trust Case Control Consortium 2007*).⁹ Als Studienresultate ergeben sich Diagramme wie in Abbildung 5 dargestellt. Hier sind auf der waagerechten Achse die 22 Chromosomen des menschlichen Genoms aufgetragen. (Die Geschlechtschromosomen werden nicht betrachtet.) Auf der senkrechten Achse ist ein Maß für die Auffälligkeit des Genortes abgetragen. Auffälligkeit bedeutet hier das gehäufte Auftreten einer Variante des Gens bei Menschen mit der betrachteten Krankheit (SHAM und PURCELL 2014). Größere Zahlen bedeuten höhere Auffälligkeit. Man sieht, dass sich aus der allgemeinen Wolke von Punkten, die Genorten entsprechen, ein paar Dutzend Genorte nach oben ablösen.

Die hier konkret genannte Studie betrachtet die Virenkonzentration im Blut bei einer HIV-Infektion (BARTHA et al. 2013). Die Betrachtung von Abbildung 5 würde nahelegen, dass etwa zwei Dutzend Genorte eine mögliche Assoziation mit dem Krankheitsbild haben, nämlich diejenigen, die sich aus dem Ozean der Punkte in der Abbildung nach oben erheben. Dem ist jedoch nicht so. Nach einer stringenteren Signifikanzanalyse weist nur ein

9 Siehe auch den *GWAS Catalog* unter www.ebi.ac.uk/gwas/.

Genort, nämlich der mit dem Pfeil gekennzeichnete, tatsächlich eine statistisch signifikante Assoziation mit dem Krankheitsbild auf. Sind wir nicht stringent genug, dann unterstellen wir vielen Genen eine Assoziation mit der Krankheit, die diese tatsächlich gar nicht aufweisen. Wie kommt das? Der Grund hierfür liegt darin, dass wir sehr viele Genorte untersuchen. Dass ein einzelner Genort rein zufällig, d. h. ohne biologische Basis, auffällig ist, ist möglich, aber sehr unwahrscheinlich – genauso, wie ein Sechser im Lotto möglich, aber sehr unwahrscheinlich ist. Wenn man aber tausende Genorte untersucht, können sich Auffälligkeiten auch rein zufällig ergeben. Wenn viele Leute Lotto spielen, wird es mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Gewinner geben. Alle in Abbildung 5 auffällig erscheinenden Genorte, außer der mit dem Pfeil gekennzeichnete, sind solche Lottogewinner – sie sind auffällig, ohne eine in den Daten begründete Basis. Einen solchen falschen Hinweis auf eine Auffälligkeit nennt man ein Falsch-Positiv. Das Risiko von Falsch-Positiven ist besonders dann groß, wenn die Analyse viele gleichartige Tests umfasst (Multiples Testen; SHAM und PURCELL 2014). Falsch-Positive sind ein großes Ärgernis bei Datenanalysen. Sie treten auch im täglichen Leben auf, beispielsweise bei einem medizinischen Test, der einem ein Krankheitsrisiko bescheinigt, das sich bei einer Nachuntersuchung nicht bestätigt, oder bei einer fälschlich angenommenen geringen Kreditwürdigkeit, die sich aus einer SCHUFA-Analyse ergibt.

In der heutigen Zeit, in der sehr viele Hypothesen auf der Basis von Datenanalysen aufgestellt werden, werden Falsch-Positive von einem Risiko zu einer wirklichen Gefahr. Wird die Datenanalyse unsachgemäß vorgenommen oder werden Schlussfolgerungen aus ihr vorschnell gezogen, so kann dies zu Fehlschlüssen, Überinterpretationen und in der Folge zur Bildung von Vorurteilen, Ausgrenzung und Stigmatisierung führen.

Das zweite Problem bei Datenanalysen ist deren Suggestivität. Heutige Datenanalysen im Allgemeinen und die Methoden, die wir diskutiert haben, im Speziellen beruhen häufig lediglich auf Beobachtungen des untersuchten Systems. In das System wird nicht kontrolliert eingegriffen. Ferner sind die Analysen assoziativ. Sie ermitteln Muster von assoziiertem Auftreten verschiedener Merkmale. Dabei sind zwei Merkmale assoziiert, wenn sie gehäuft gleichzeitig auftreten (Korrelation), oder aber wenn das Auftreten des einen Merkmals gehäuft in Abwesenheit des anderen Merkmals beobachtet wird (Antikorrelation), jeweils im Vergleich zu dem einzelnen Auftreten der beiden Merkmale. Solche Analysen können eine erstaunliche Vorhersagekraft haben. In jüngster Zeit bekommen entsprechende Fallbeispiele viel Aufmerksamkeit, etwa, dass man auf der Basis von ein paar Dutzend Likes aus Facebook mittels Datenanalyse die Persönlichkeit des Nutzers genauer charakterisieren kann als ein enger Freund oder Partner (YOUYOU et al. 2015) oder dass aus Gesichtsbildern mittels Datenanalyse intime Aspekte der Persönlichkeitsstruktur abgeleitet werden können (WANG und KOSINSKI 2018). Wenn auch die Genauigkeit solcher Vorhersagen hoch ist, kann die Vorhersage im Einzelnen dennoch nicht mit einer kausalen Begründung ausgestattet werden. Und es gibt natürlich immer auch falsche Vorhersagen, die in bestimmten Zusammenhängen weitreichende negative Konsequenzen haben können. Dem Nutzer suggerieren die Vorhersagen jedoch oft kausale Zusammenhänge, die sie in der Tat nicht belegen und die häufig nicht einmal bestehen. Hier treffen heutige Datenanalysen auf ernsthafte Grenzen.

Betrachten wir folgende Beispiele:

- (1.) Eine genomweite Assoziationsstudie deckt die Auffälligkeit eines Gens bezüglich eines Krankheitsbildes auf. Ist damit erwiesen, dass das Gen ursächlich für die Krankheit ist?

- (2.) Eine statistische Studie zeigt, dass bei Leuten, die in der Nähe eines Kernkraftwerks wohnen, ein bestimmter Krebs gehäuft auftritt. Ist damit erwiesen, dass das Kernkraftwerk Strahlung abgibt, die die Ursache für das gehäufte Auftreten des Krebses ist?
- (3.) Eine Studie zeigt, dass bei Rauchern die Parkinson-Krankheit mit geringerer Häufigkeit auftritt. Wie verhält es sich hier mit den Kausalbeziehungen?

Nennen wir die zwei in Assoziation stehenden Größen X und Y . Generell legen Assoziationen zwischen X und Y einen kausalen Zusammenhang zwischen den beiden Größen nahe. Was aber hier Ursache und was Wirkung ist, bleibt unklar (AALEN und FRIGESSI 2007). Abbildung 6 zeigt drei Möglichkeiten des kausalen Zusammenhangs zwischen X und Y . Im Fall (A) ist X Ursache für Y . Im Fall (B) ist es umgekehrt. Im komplexesten Fall (C) geht die Assoziation zwischen X und Y auf eine dritte Größe Z zurück, die zu den beiden Größen X und Y im ursächlichen Zusammenhang steht. In vielen Fällen gibt es solche sogenannten Störgrößen. Dies sind Größen, die im Rahmen der statistischen Studie nicht gemessen werden, aber mehrere gemessene Größen beeinflussen. Im Falle (2.) hat sich bei einer tatsächlichen Studie herausgestellt, dass die radioaktive Strahlung, die aus dem Kernkraftwerk entweicht, so gering ist, dass sie keine Ursache für gehäufte Krebsfälle sein kann. Es gibt jedoch andere Größen, etwa die demographische Zusammensetzung der Bevölkerung in der Nähe eines Kernkraftwerks betreffend, die auf die Krebsrate sehr wohl einen Einfluss haben. Eklatante Beispiele wie die Tatsache, dass die Anzahl von Storchenpaaren in einer Region mit der dortigen Geburtenrate assoziiert ist (MATTHEWS 2000), zeigen, mit welcher Vorsicht man an Interpretationen der Resultate von Datenanalysen herangehen muss.

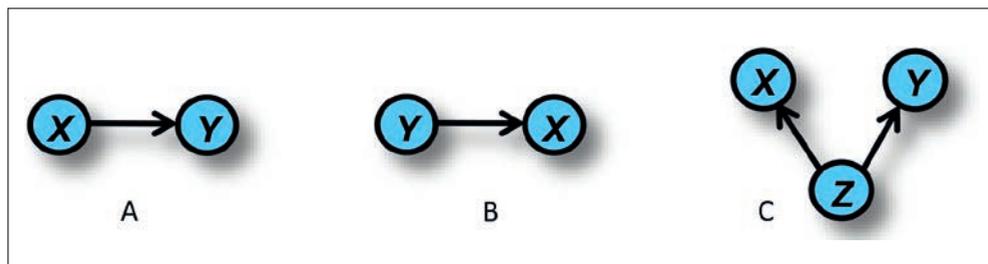


Abb. 6 Drei Möglichkeiten für kausale Abhängigkeiten zwischen assoziierten Variablen

Es gibt jedoch auch Korrelationen, bei denen nicht einmal ein solcher Störfaktor zu finden ist. Das liegt wiederum an dem eingangs in diesem Abschnitt diskutierten Phänomen, das beim multiplen Testen auftritt: Wenn man nur genug Datensätze zur Verfügung hat, wird man solche finden, die hohe Korrelationen anzeigen, denen aber keinerlei gesetzmäßige Grundlage unterliegt. Es sind einfach Glückstreffer. Eine Sammlung solcher „unechter Korrelationen“ (*spurious correlations*) ist in VIGEN (2015) zu finden.¹⁰

In jüngster Zeit hat gerade das Aufkommen von *Big Data* in der Statistik eine dynamische Entwicklung eingeleitet, u. a. mit dem Ziel der Ableitung von kausalen Zusammenhängen aus statistischen Assoziationen. Solche Zusammenhänge können jedoch nicht

¹⁰ Siehe auch die Webseite <http://www.tylervigen.com/spurious-correlations>.

allein durch die Beobachtung des untersuchten Systems aufgedeckt werden, sondern man muss dazu in das System kontrolliert eingreifen, d. h. experimentieren. Prospektive klinische Studien zur Untersuchung der Wirksamkeit von Medikamenten und Therapien sind ein Beispiel solchen Vorgehens. Die Daten, die dabei entstehen, werden geeignet statistisch analysiert, um Kausalzusammenhänge aufzudecken, etwa, dass die Gabe des Medikaments ursächlich für die Besserung des Patienten ist. Dieses Vorgehen ist in den letzten Jahren zunehmend mit einem theoretischen Unterbau versehen worden und wird heute auch außerhalb der Medizin angewandt. Es gibt eine für den allgemeinen Leser zugängliche Einführung in dieses Gebiet (PEARL und MACKENZIE 2018). Einführende Fachbücher gibt es ebenfalls (PETERS et al. 2017, PEARL 2009). Es gibt auch bereits Anwendungen, etwa in der Genomik (PINGAULT et al. 2018) und Astronomie (WANG et al. 2016). Die Entwicklung dieser Methoden ist jedoch noch nicht soweit gereift, dass sie breitflächig die Analyse hochdimensionaler Daten bewältigen. Und selbst solche Methoden verleihen in der Regel kein Verständnis über die mechanistische Grundlage der aufgedeckten Ursache-Wirkungsbeziehung. In einer klinischen Studie wird z. B. nachgewiesen, dass ein Medikament wirkt, aber nicht, wie oder warum es wirkt. Dieses tiefere Verständnis wird nach wie vor durch Theoriebildung und die experimentelle Bestätigung der Theorie erzielt.

Die heute meistverbreitete Art der Datenanalyse, nämlich die assoziative Datenanalyse auf der Basis von Beobachtungen, kann jedoch helfen, Hypothesen über kausale Zusammenhänge aufzustellen bzw. vielversprechende Hypothesen aus einer zunächst unüberschaubaren Vielfalt von Kandidatenhypothesen auszuwählen. Ein Beispiel hierfür ist die Eingrenzung des Hypothesenraums für ursächliche Zusammenhänge zwischen Varianten im Genom eines Patienten und seinem Krankheitsbild mittels einer genomweiten Assoziationsanalyse. Hier werden aus der Vielfalt aller Genomvarianten solche selektiert, die mit dem Krankheitsbild assoziiert sind und damit einen Hinweis auf ursächliche Zusammenhänge liefern können. Solchen Hinweisen kann dann mit anderen Methoden der Molekularbiologie nachgegangen werden.

6. Datenanalyse und Theoriebildung: Ein starkes Gespann

Was ist also unser Fazit aus diesen Überlegungen? Ist *Big Data* der Motor der Innovation in unserem heutigen Zeitalter, wie viele Leute meinen? Nach dieser Meinung beherbergen die Daten und insbesondere die in ihnen enthaltenen Muster alle nützliche Information. Es ist völlig ausreichend, dass die Daten die Ableitung von Modellen mit hoher Vorhersagegenauigkeit erlauben. Es ist nicht notwendig, dass die Modelle auch kausales Verständnis liefern. Kausalität ist sowieso etwas, was nur durch die kognitiven Fähigkeiten des Menschen (und vielleicht in Ansätzen einiger anderer hochentwickelter Tiere) in das Universum Eingang gefunden hat. Bis dahin kam die Natur auch ganz gut ohne diesen Begriff aus und hat es mit lediglich den Anpassungs- und Lernmechanismen, die auch der assoziativen Datenanalyse unterliegen, sehr weit gebracht. Ist *Big Data* also der Beginn einer Veränderung der Gesellschaft, die zunehmend mehr auf Assoziationen vertraut als auf das aus sorgfältiger Ableitung von kausalen Zusammenhängen resultierende Verständnis – mit allen erwähnten Begleiterscheinungen wie Verdachten und Vorurteilen, die aus Datenanalysefehlern resultieren, und mit der Illusion von Kausalzusammenhängen, die nicht wirklich überprüft wurden?

Ich meine, dass die assoziative Datenanalyse im Zeitalter von *Big Data* ein mächtiges Instrument ist, das mit großer Sorgfalt verwendet werden muss. Ein assoziatives Datenmodell mit hoher Vorhersagekraft hat eine hohe Anwendbarkeit, wie wir am HIV-Beispiel gesehen haben. Für die Therapie des Patienten ist es zwar wünschenswert, aber nicht unbedingt notwendig, die kausalen Zusammenhänge zu verstehen. Das würde eine separate kontrollierte Studie für jede mögliche Medikamentenkombination erfordern, was aus grundsätzlichen Erwägungen nicht umsetzbar ist. Ähnliches gilt für viele Bereiche des Lebens, überall dort, wo ein Verständnis der Kausalzusammenhänge außer Reichweite ist, etwa im Finanzwesen oder bei der Analyse psychologischer oder gesellschaftlicher Prozesse. Es ist jedoch auch wichtig, die Ergebnisse der Datenanalyse und den Prozess, mit dem sie entstanden sind, kritisch zu hinterfragen. Insbesondere muss man sich immer wieder bewusst machen, dass solche Analysen keine Kausalzusammenhänge aufdecken. So kann man sich gegen die Suggestivität ihrer Resultate wappnen. Diese „statistische Kompetenz“ wird in Zukunft ein immer wichtigerer Aspekt der digitalen Kompetenz des Bürgers werden.

In der Wissenschaft kann die Datenanalyse als ein effektiver Vorfilter für Untersuchungen dienen, die Kausalzusammenhänge aufdecken. Früher diene allein der Geist des Forschers als Instrument, eine plausible Hypothese aufzustellen, die dann systematisch durch Experimente validiert oder falsifiziert werden konnte. Heute können wir das Instrument der Datenanalyse einsetzen, um aus einer zunächst unüberschaubaren Hypothesenvielfalt systematisch eine begrenzte Menge von vielversprechenden Hypothesen auszuwählen, die dann mit Methoden, die sich in der Wissenschaft seit Jahrhunderten bewährt haben, überprüft werden können. In einem solchen Szenario wird die Datenanalyse, wo immer möglich, durch eine auf die Aufdeckung von Kausalzusammenhängen und auf Theoriebildung zur Erklärung der mechanistischen Grundlage für die beobachteten Gesetzmäßigkeiten abzielende Nachuntersuchung ergänzt. Letzteres findet in der Forschung vor allem in den Naturwissenschaften schon lange umfänglich statt. Den Vorschlägen, die sich aus der Datenanalyse ergeben, wird hierbei die notwendige kritische Vorsicht entgegengebracht. Als Instrument zur Eingrenzung von Hypothesenvielfalt ist die Datenanalyse in einem solchen Szenario von enormem Nutzen und oft sogar in der Tat unverzichtbar.

Dank

Ich danke Christian LENGAUER, Jörg RAHNENFÜHRER und Nico PFEIFER für eine kritische Durchsicht des Manuskripts. Die Fallbeispiele in Abbildung 1 bzw. 5 wurden von Anna HAKE bzw. Nico PFEIFER beigesteuert.

Literatur

- AALÉN, O. O., and FRIGESSI, A.: What can statistics contribute to a causal understanding? *Scandinavian Journal of Statistics* 34/1, 155 (2007)
- BARTHA, I., CARLSON, J. M., BRUMME, C. J., MCLAREN, P. J., BRUMME, Z. L., JOHN, M., HAAS, D. W., MARTINEZ-PICADO, J., DALMAU, J., LÓPEZ-GALÍNDEZ, C., CASADO, C., RAUCH, A., GÜNTHARD, H. F., BERNASCONI, E., VERNAZZA, P., KLIMKAIT, T., YERLY, S., O'Brien, S. J., LISTGARTEN, J., PFEIFER, N., LIPPERT, C., FUSI, N., KUTALIK, Z., ALLEN, T. M., MÜLLER, V., HARRIGAN, P. R., HECKERMAN, D., TELENTI, A., and FELLAY, J.: A genome-to-genome analysis of associations between human genetic variation, HIV-1 sequence diversity, and viral control. *Elife* 2, e01123 (2013)
- BEERENWINKEL, N., SCHMIDT, B., WALTER, H., KAISER, R., LENGAUER, T., HOFFMANN, D., KORN, K., and SELBIG, J.: Diversity and complexity of HIV-1 drug resistance: a bioinformatics approach to predicting phenotype from genotype. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 99/12, 8271–8276 (2002)
- CHATRCHYAN, S., et al.: Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Physics Letters B* 716/1, 30–61 (2012)
- DÖRING, M., BÜCH, J., FRIEDRICH, G., PIRONTI, A., KALAGHATGI, P., KNOPS, E., HEGER, E., OBERMEIER, M., DÄUMER, M., THIELEN, A., KAISER, R., LENGAUER, T., and PFEIFER, N.: geno2pheno[ngs-freq]: a genotypic interpretation system for identifying viral drug resistance using next-generation sequencing data. *Nucleic Acids Research* 46/W1, W271–W277 (2018)
- EINSTEIN, A.: Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 49/7, 769–822 (1916)
- EINSTEIN, A.: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. 24. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2009
- GHIRINGHELLI, L. M., VYBIRAL, J., LEVCHENKO, S. V., DRAXL, C., and SCHEFFLER, M.: Big data of materials science: Critical role of the descriptor. *Physical Review Letters* 114/10, 105503 (2015)
- GRASSHOFF, G.: Globalization of ancient knowledge: From Babylonian observations to scientific regularities. In: RENN, J. (Ed.): *The Globalization of Knowledge in History*. Edition Open Access 2012
- GUO, H.-D., ZHANG, L., and ZHU, L.-W.: Earth observation big data for climate change research. *Advances in Climate Change Research* 6/2, 108–117 (2015)
- HESSE, B. W., MOSER, R. P., and RILEY, W. T.: From big data to knowledge in the social sciences. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science* 659/1, 16–32 (2015)
- HORVÁTH, D., and *CMS Collaboration*: Search for the Higgs boson: a statistical adventure of exclusion and discovery. *Journal of Physics Conference Series* 510, 012001 (2014)
- IVEZIĆ, Ž., BEERS, T. C., and JURIC, M.: Galactic stellar populations in the era of the sloan digital sky survey and other large surveys. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 50/1, 251–304 (2012)
- KEPLER, J.: *Astronomia Nova*. Heidelberg: Voegelin 1609
- KEPLER, J.: *Hamonices Mundi*. Francofurti: Tampachius. *Lincii Austriae: Plancus* 1619
- KEPLER, J.: *Tabulae Rudolphinae*. Ulmae: Saurius 1627
- LENGAUER, T.: Macht, Suggestivität, Grenzen und Risiken der Datenanalyse in den Zeiten von Big Data. In: GRÖTSCHEL, M., KNOBLOCH, E., SCHIFFERS, J., WOISNITZA, M., und ZIEGLER, G. M. (Hrsg.): *Vision als Aufgabe – Das Leibniz Universum im 21. Jahrhundert*. S. 125–144. Berlin: Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften 2016
- LENGAUER, T., und KAISER, R.: Computerjagd auf das AIDSvirus. *Spektrum der Wissenschaft* 8, 62–67 (2009)
- LENGAUER, T., and SING, T.: Bioinformatics-assisted anti-HIV therapy. *Nature Review Microbiology* 4/10, 790–797 (2006)
- LEVIN, J. D., and EINAV, L.: The data revolution and economic analysis. *NBER Innovation Policy and the Economy* 14, 1–24 (2014)
- LUSHER, S. J., MCGUIRE, R., VAN SCHAİK, R. C., NICHOLSON, C. D., and VLIEG, J. DE: Data-driven medicinal chemistry in the era of big data. *Drug Discovery Today* 19/7, 859–868 (2014)
- MAROULI, E., et al.: Rare and low-frequency coding variants alter human adult height. *Nature* 542/7640, 186–190 (2017)
- MATTHEWS, R.: Storks deliver babies ($p = 0.008$). *Teaching Statistics* 22/2, 36–38 (2000)
- MICHAÏLIDOU, K., et al.: Genome-wide association analysis of more than 120,000 individuals identifies 15 new susceptibility loci for breast cancer. *Nature Genetics* 47/4, 373–380 (2015)
- NEWTON, I.: *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Londini: Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater 1687
- PEARL, J.: *Causality: Models, Reasoning and Inference*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press 2009

- PEARL, J., and MACKENZIE, D.: *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*. New York (NY, USA): Basic Books 2018
- PENNISI, E.: Genomics. 1000 Genomes Project gives new map of genetic diversity. *Science* 330/6004, 574–575 (2010)
- PETERS, J., JANZING, D., and SCHÖLKOPF, B.: *Elements of Causal Inference, Foundations and Learning Algorithms*. Cambridge (MA, USA), London: The MIT Press 2017
- PINGAULT, J. B., O'REILLY, P. F., SCHOELER, T., PLOUBIDIS, G. B., RIJSDIJK, F., and DUDBRIDGE, F.: Using genetic data to strengthen causal inference in observational research. *Nature Review Genetics* 19/9, 566–580 (2018)
- RAJAN, K.: Materials informatics: The materials “gene” and big data. *Annual Review of Materials Research* 45/1, 153–169 (2015)
- SHAM, P. C., and PURCELL, S. M.: Statistical power and significance testing in large-scale genetic studies. *Nature Review Genetics* 15/5, 335–346 (2014)
- SELLARS, S., NGUYEN, P., CHU, W., GAO, X., HSU, K.-I., and SOROOSHIAN, S.: Computational earth science: Big data transformed into insight. *Eos Transactions American Geophysical Union* 94/32, 277–278 (2013)
- STEPHENSON, B.: *Kepler's Physical Astronomy*. New York: Springer 1987
- The ENCODE Project Consortium*: An integrated encyclopedia of DNA elements in the human genome. *Nature* 489/7414, 57–74 (2012)
- THIELEN, A., and LENGAUER, T.: Geno2pheno[454]: A web server for the prediction of HIV-1 coreceptor usage from next-generation sequencing data. *Intervirology* 55/2, 113–117 (2012)
- VIGEN, T.: *Spurious Correlations*. New York (NY, USA): Hachette Books 2015
- VISSCHER, P. M., WRAY, N. R., ZHANG, Q., SKLAR, P., MCCARTHY, M. I., BROWN, M. A., and YANG, J.: 10 years of GWAS discovery: Biology, function, and translation. *The American Journal of Human Genetics* 101/1, 5–22 (2017)
- VITOLO, C., ELKHATIB, Y., REUSSER, D., MACLEOD, C. J. A., and BUYTAERT, W.: Web technologies for environmental big data. *Environmental Modelling & Software* 63, 185–198 (2015)
- WANG, D., HOGG, D. W., FOREMAN-MACKEY, D., and SCHÖLKOPF, B.: A causal, data-driven approach to modeling the Kepler data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128/967 (2016)
- WANG, Y., and KOSINSKI, M.: Deep neural networks are more accurate than humans at detecting sexual orientation from facial images. *Journal of Personality and Social Psychology* 114/2, 246–257 (2018)
- Wellcome Trust Case Control Consortium*: Genome-wide association study of 14,000 cases of seven common diseases and 3,000 shared controls. *Nature* 447/7145, 661–678 (2007)
- YOUYOU, W., KOSINSKI, M., and STILLWELL, D.: Computer-based personality judgments are more accurate than those made by humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 112/4, 1036–1040 (2015)
- ZAZZI, M., INCARDONA, F., ROSEN-ZVI, M., PROSPERI, M., LENGAUER, T., ALTMANN, A., SONNERBORG, A., LAVEE, T., SCHÜLTER, E., and KAISER, R.: Predicting response to antiretroviral treatment by machine learning: The EuResist Project. *Intervirology* 55/2, 123–127 (2012)

Prof: Dr. Thomas LENGAUER
Max-Planck-Institut für Informatik
Saarland Informatik Campus
Campus E1 4
66123 Saarbrücken
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 681 93253000
Fax: +49 681 93253099
E-Mail: lengauer@mpi-inf.mpg.de

Anhang

Podiumsdiskussion

Natur – Naturverständnis – Gesellschaft

Einführungsbeiträge

Naturverständnis in einer technisierten Gesellschaft

Bärbel FRIEDRICH ML (Berlin)

Bevor wir auf das vergangene Jahrzehnt, die Gegenwart und Zukunft der Leopoldina als Nationale Akademie der Wissenschaften eingehen, möchte ich versuchen, den Blick noch einmal auf die Gelehrtenengesellschaft der Akademie der Naturforscher Leopoldina zu richten. Werner HEISENBERG (Ehrenmitglied der Leopoldina) hat 1967 einen Aufsatz über das Naturbild GOETHEs und die technisch-naturwissenschaftliche Welt aus der Sicht des Physikers verfasst.

Darin beschreibt er, dass für GOETHE das Naturverständnis mit dem unmittelbaren sinnlichen Eindruck begann. Dies wird erkennbar in seinen Studien zur Metamorphose der Pflanzen und der Farbenlehre. Letztere stand ja im Konflikt zur allgemein anerkannten Optik NEWTONS. Doch HEISENBERG bemerkt, dass GOETHE, der ja 1816 aufgrund seiner Arbeiten zur Morphologie der Pflanzen in die Leopoldina aufgenommen wurde, keineswegs bei der unmittelbaren Beobachtung stehen blieb. So heißt es im Vorwort zur Farbenlehre:

„Jedes Ansehen geht über in ein Betrachten, jedes Betrachten in ein Sinnen, jedes Sinnen in ein Verknüpfen und so kann man sagen, dass wir schon mit jedem aufmerksamen Blick in die Welt theoretisieren.“

Theoretisieren setzt Abstraktion voraus, vor der sich GOETHE fürchtete. Im Anblick der Vielgestaltigkeit der Pflanzen spricht er „von der wesentlichen Form mit der die Natur gleichsam nur immer spielt und spielend das mannigfaltige Leben hervorbringt“. Er prägt den Begriff Urphänomen, zu dem auch die Urpflanze zählt. Er empfiehlt dann aber: „Der Naturforscher lasse die Urphänomene in ihrer ewigen Ruhe und Herrlichkeit bestehen.“ Da sieht er Grenzen, da könnte *Mephisto* ins Spiel kommen.

Die Naturwissenschaften sind dem Urphänomen dagegen zielstrebig auf den Grund gegangen. HEISENBERG schreibt dazu:

„Inzwischen sind wieder fast anderthalb Jahrhunderte vergangen, und wir wissen, wohin dieser Weg bis heute geführt hat. Düsenflugzeuge, elektronische Rechenmaschinen, Mondraketen, Atombomben, das sind etwa die letzten Meilensteine, denen wir am Wegrand begegnet sind. Die von der Newtonschen Naturwissenschaft bestimmte Welt, von der Goethe hoffte, daß er ihr ausweichen könnte, ist also unsere Wirklichkeit geworden, und es hilft uns gar nichts, daran zu denken, daß in ihr auch Fausts Partner seine Hand im Spiel hatte. [...] Wahrscheinlich ist die Zeit nicht mehr fern in der auch die Biologie in diesen Entwicklungsprozess der Technik voll einbezogen wird.“

In der Tat ist die Biologie inzwischen Teil der technisch-naturwissenschaftlichen Welt geworden. Spätestens seit WATSON und CRICK 1953 die Grundstruktur des Lebens, die DNA,

entschlüsselt haben, können wir nicht nur die Urpflanze, sondern den Bauplan aller Lebewesen weitgehend erklären. Wir sprechen heute von der Urzelle oder gar von einer synthetischen maßgeschneiderten Zelle, die die Kriterien des Lebens erfüllt. So haben die bahnbrechenden naturwissenschaftlichen Erkenntnisse des zurückliegenden Jahrhunderts durchaus ambivalente Folgen, nützliche wie auch Besorgnis erregende.

Die Fortschritte in der modernen Medizin haben zur weitgehenden Ausrottung von Infektionskrankheiten, neuen Therapie- und Diagnostikverfahren geführt (Stichworte sind beispielsweise Hygiene, Ernährung, Antibiotika, medizinische und genetische Diagnostik). All diese Errungenschaften haben dazu beigetragen, dass die Lebenserwartung des Menschen drastisch stieg. In Europa lag die Lebenserwartung um 1820 bei etwa 36 Jahren, die durchschnittliche Lebenserwartung von Frauen bei der Geburt im Jahr 2018 liegt in Westeuropa bei 84 Jahren. Die resultierende Bevölkerungsexplosion erfordert, dass derzeit 7 Milliarden und 2050 voraussichtlich sogar 9 Milliarden Menschen weltweit zu ernähren sind. Die damit einhergehende industrialisierte Landwirtschaft hat Auswirkungen auf das Ökosystem, die Biodiversität und die Klimaentwicklung. Neue bahnbrechende Entwicklungen, die unser Leben einerseits angenehmer gestalten, z. B. bei der Kommunikation, der Mobilität und vieles mehr, haben zum Teil unabsehbare Folgen für das Individuum, für das Staatgefüge und global betrachtet für den ganzen Planeten Erde. Es ist Aufgabe einer nationalen Akademie, möglichst im internationalen Verbund sich mit diesen Fragen wissenschaftsbasiert zu beschäftigen, die Gesellschaft verständlich aufzuklären und den politischen Instanzen Hilfe für die politischen Entscheidungen zu geben. HEISENBERG resümiert an einer Stelle des erwähnten Aufsatzes:

„Ob der erreichte Fortschritt wertvoll ist, entscheidet sich erst mit den Wertvorstellungen, von denen sich die Menschen beim Setzen der Ziele leiten lassen. Diese Wertvorstellungen aber können nicht aus der Wissenschaft selbst kommen, jedenfalls kommen Sie derzeit nicht daher.“

Kann oder sollte eine Nationale Akademie der Wissenschaften zu diesen Wertvorstellungen beitragen? Ich denke ja, dies ist eine ihrer vornehmsten Aufgaben.

Literatur

HEISENBERG, W.: Das Naturbild Goethes und die technisch-naturwissenschaftliche Welt. Jahrbuch der Goethe-Gesellschaft 29, 27–42 (1967)

Prof. Dr. Bärbel FRIEDRICH
Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina –
Nationale Akademie der Wissenschaften
Berliner Büro
Reinhardtstraße 14
14163 Berlin
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 30 20 38 99 74 20
E-Mail: baerbel.friedrich@cms.hu-berlin.de

Die Bedeutung der Psychologie für die Politikberatung

Frank RÖSLER ML (Hamburg)

„Die Psychologie erforscht als Grundlagen- und Anwendungswissenschaft das Erleben und Verhalten von Menschen mit empirischen und experimentellen Methoden. In der Grundlagenforschung werden dazu allgemeine, für alle Menschen gleichermaßen geltende Funktionsprinzipien des Denkens, der Wahrnehmung, der Persönlichkeit, der Entwicklung, oder der sozialen Interaktion untersucht. In den Anwendungsfächern – z. B. Pädagogische Psychologie, Klinische Psychologie, Wirtschaftspsychologie – werden Erkenntnisse aus Grundlagenfächern für angewandte Fragestellungen nutzbar gemacht, bzw. es werden spezifische Anwendungsprobleme mit den Methoden der Psychologie erforscht (z. B. Forensische Psychologie, Verkehrspsychologie).

In allen Fällen versteht sich die Psychologie dabei als eine empirische bzw. experimentelle Wissenschaft, d. h., zu all diesen Fragen werden entweder kontrollierte Experimente oder genau kontrollierte Beobachtungen durchgeführt. Auf diese Weise werden objektive (d. h. vom einzelnen Beobachter unabhängige), zuverlässige (d. h. bei wiederholter Messung vergleichbare) und valide (d. h. in Bezug auf die Fragestellung bzw. Theorie gültige) Daten erhoben, die dann hinsichtlich ihrer Aussagekraft überprüft werden (Falsifikationsprinzip).“ (RÖSLER 2019.)

Die Psychologie orientiert sich also in ihrem Forschungsprogramm an den erkenntnistheoretischen Leitlinien der Naturwissenschaften.

Erkenntnisse aus der Psychologie, und weiter gefasst, Erkenntnisse aus allen empirischen Verhaltenswissenschaften (Ökonomie, Soziologie) sind grundlegend für eine wissenschaftlich basierte Politikberatung und Aufklärung der Öffentlichkeit. Man denke an aktuelle Themen wie Bevölkerungswachstum, Adipositas-Epidemie, Schutz der Artenvielfalt, Nachhaltiger Umgang mit Ressourcen, Verschmutzung der Ozeane und der Atmosphäre, Antibiotikaresistenz, Entwicklung der Finanzmärkte, Vorurteile und Diskriminierung, oder Gentechnik. Bei all diesen Themen kann man viel über technische und gesetzgeberische Lösungen nachdenken, diese mit geeigneten Maßnahmen versuchen durchzusetzen. Der Erfolg wird allerdings begrenzt sein, solange man nicht versteht, wie Handlungsmuster und Einstellungen entstehen und wie diese verändert werden können. Es sind die Menschen, die aufgrund ihres mehr oder weniger fundierten Wissens, ihrer Überzeugungen, ihrer Motivationen und ihrer Ziele entscheiden und handeln. Das Wissen darüber, wie Einstellungen und Handlungen entstehen, wie sachgerechtes Wissen und wie Kompetenzen erworben und verbessert werden, ist zentral, um bei all den brennenden Problemen wirksame und nachhaltige Veränderungen anstoßen zu können.

Zur Illustration einige Beispiele aus der Grundlagenforschung:

Befunde aus der Kognitionspsychologie zeigen z. B., dass Menschen schlecht mit Wahrscheinlichkeiten umgehen können, dass sie systematischen Irrtümern beim Denken unterliegen oder dass Gruppenentscheidungen zur Verantwortungsdiffusion verleiten. All das hat einen unmittelbaren Anwendungsbezug. Hier geht es um Aufklärung, um die Gestaltung von Entscheidungsprozessen in einer Weise, dass sie auf die Grenzen menschlichen Denkens abgestimmt sind (z. B. Probleme statt in Wahrscheinlichkeiten besser in Häufigkeiten formulieren) (GIGERENZER et al. 2007). Menschen, insbesondere Politiker und Entscheider (Manager, Richter, Lehrer usw.), müssen trainiert werden, so dass sie die Möglichkeit von Denkirrtümern erkennen und dann davon unabhängig werden (KAHNEMAN 2012).

Emotionen und Einstellungen werden durch Informationen beeinflusst, gegebenenfalls manipuliert (BOHNER und DICKEL 2011). Wie geschieht das, wie kann man dem entgegenwirken? Wie entstehen Vorurteile, wie kann man dagegen arbeiten? Wie kann man die Ursachen verzerrter Einstellungen erkennen und gegebenenfalls verhindern? Erkenntnisse zu diesen Fragen sind entscheidend dafür, dass Menschen realistische und durch Fakten begründete Einstellungen entwickeln, etwa zum Thema Impfungen (z. B. BETSCH et al. 2010), Grüne Gentechnik (z. B. STRÖBE 2019), Klimawandel und Energieerzeugung (z. B. BIDWELL 2016), oder Öffentlicher versus Individualverkehr (z. B. BURIAN et al. 2018).

Und einige Beispiele aus der Anwendungsforschung:

Entscheidend für den Erfolg in Ausbildungseinrichtungen und in Betrieben ist es, ob Menschen optimal, gemäß ihren Interessen und Kompetenzen, platziert und gefördert werden. Dazu ist es nützlich, Schuleignungs- und Berufseignungstests sowie Methoden zur Personalauswahl und Personalentwicklung zu etablieren, mit denen Verhalten in schulischen, universitären und betrieblichen Kontexten verlässlich vorhergesagt werden kann (SCHMITT 2014).

Arbeitsplätze müssen so gestaltet werden, dass sie auf die Kompetenzen der Arbeitnehmer optimal abgestimmt sind, dass die Arbeitssituation nicht überfordert, dass keine Überlastungen mit gegebenenfalls gesundheitlichen und psychischen Beeinträchtigungen entstehen, und dass Gruppenpotentiale möglichst konfliktfrei und effektiv genutzt werden (z. B. RAU und BUYKEN 2015). Für den Arbeitnehmer sollte der Arbeitsplatz eine möglichst anspruchsvolle, abwechslungsreiche Herausforderung mit der Möglichkeit zur Weiterentwicklung bieten. Zugleich müssen Arbeitnehmer optimal für ihre Tätigkeiten ausgebildet werden. Zur Lösung dieser Fragen stehen Methoden der Arbeits-, Betriebs- und Wirtschaftspsychologie zur Arbeitsplatzgestaltung, zur Optimierung von Mensch-Maschine-Systemen, zur Gestaltung von Team- und Gruppenarbeit zur Verfügung, sowie die Methoden der Pädagogischen Psychologie zur Gestaltung der schulischen, universitären und nicht akademischen Ausbildung.

Erkrankungen, die sich in psychischen Störungen manifestieren (Ängste, Panikattacken, Depressionen, Denkstörungen, posttraumatische Belastungsstörungen, etc.), werden in der individuellen Krankengeschichte oft erst spät erkannt und zielführend behandelt. Menschen mit psychischen Symptomen werden stigmatisiert, bzw. die Symptomatik wird oft als weniger bedeutsam abgetan. Die Klinische Psychologie verfolgt das Ziel, objektive und verlässliche Diagnoseverfahren und Therapiemethoden zu entwickeln, die wirksam und ökonomisch sind und die mittels Verhaltens- und Erlebnismodifikation das individuelle Leid lindern bzw. die Krankheit heilen (z. B. MARGRAF und SCHNEIDER 2018).

Effektivitätsstudien haben u. a. gezeigt, dass eine auf Prinzipien der Lernpsychologie basierende Verhaltenstherapie bei Phobien wirksamer und vor allen Dingen nachhaltiger sein kann als die Gabe von Anxiolytika. Unerkannte und dadurch nicht korrekt behandelte Depressionen können langjähriges menschliches Leid und eine Facharztdyssee bedingen, da häufig die so Erkrankten zunächst klassische medizinische Hilfe suchen.

In den letzten 10 Jahren waren psychologische Forschungsergebnisse mehrfach Ausgangspunkt für Stellungnahmen, bzw. sie sind regelmäßig in Stellungnahmen berücksichtigt worden.

In der Stellungnahme zur *Frühkindlichen Sozialisation* wurde von Experten zusammenfassend dargestellt, was in den ersten Lebensjahren passieren sollte, damit Kinder für das Leben optimal „gerüstet“ sind (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* 2014). Wie lassen sich Potentiale fördern, und wie lassen sich negative Einflüsse in der Entwicklung verringern? Wann müssen bestimmte Umwelterfahrungen gemacht werden (z. B. Sprachen gelernt werden), damit der Gewinn besonders groß ist? Welche Merkmale sind es, die besonders gefördert werden sollten, damit die Chancen für ein erfolgreiches Leben so groß wie möglich sind?

In den Stellungnahmen zum Thema „Altern in Deutschland“, wurden die Konsequenzen, die Chancen und Risiken behandelt, die sich aus dem *Demographischen Wandel* und der allgemein gestiegenen Lebenserwartung ergeben (KOCKA und STAUDINGER 2009). Dazu gehören Fragen, wie sich auch ältere Menschen in das Arbeitsleben integrieren lassen, wo und wie sie dabei unterstützt werden müssen, welche Voraussetzungen geschaffen werden müssen, damit Menschen die gewonnenen Lebensjahre möglichst gesund erleben, und welche Techniken zur Unterstützung älterer Menschen genutzt werden sollten.

Die Stellungnahme *Traumatisierte Flüchtlinge* macht Vorschläge, wie der großen Zahl von Menschen, die aufgrund von Flucht und Vertreibung in den letzten Jahren nach Deutschland gekommen sind und die aufgrund ihrer Erfahrungen im Heimatland bzw. auf der Flucht traumatisiert sind, geholfen werden kann (*Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* 2018). Wichtig ist dabei eine frühe Diagnostik und davon ausgehend eine auf die Schwere der Belastung und die Art der Störung abgestimmte Behandlungsmaßnahme.

In einer Wissenschaftlichen Kommission der Leopoldina zum Thema „Individuelles Handeln – Gesellschaftliche Konsequenzen“ geht es darum, Themen zu identifizieren und für Stellungnahmen vorzubereiten, bei denen psychologische Erkenntnisse der Verhaltenssteuerung und Verhaltensmodifikation zur Lösung gesellschaftlicher Probleme eingesetzt werden können. Mögliche Themen, bei denen verhaltenswissenschaftliche Erkenntnisse eine zentrale Bedeutung haben, sind u. a. Übergewicht, *Compliance*-Kultur, individuelle Altersvorsorge, Impfmüdigkeit, Individualverkehr.

Literatur

- BETSCH, C., RENKEWITZ, F., BETSCH, T., and ULSHÖFER, C.: The influence of vaccine-critical websites on perceiving vaccination risks. *Journal of Health Psychology*, 15/3, 446–455 (2010), <https://doi.org/10.1177/1359105309353647>
- BIDWELL, D.: The effects of information on public attitudes toward renewable energy. *Environment and Behavior* 48/6, 743–768 (2016), <https://doi.org/10.1177/0013916514554696>

- BOHNER, G., and DICKEL, N.: Attitudes and attitude change. *Annual Review of Psychology* 62, 391–417 (2011), <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.121208.131609>
- BURIAN, J., ZAJÍČKOVÁ, L., IVAN, I., and MACKŮ, K.: Attitudes and motivation to use public or individual transport: A case study of two middle-sized cities. *Social Sciences* 7/6, 83 (2018), <https://doi.org/10.3390/socsci7060083>
- GIGERENZER, G., GAISSMAIER, W., KURZ-MILCKE, E., SCHWARTZ, L. M., and WOLOSHIN, S.: Helping doctors and patients make sense of health statistics. *Psychological Science in the Public Interest* 8/2, 53–96 (2007) Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1111/j.1539-6053.2008.00033.x>
- KAHNEMAN, D.: *Schnelles Denken, langsames Denken*. München: Siedler 2012
- KOCKA, J., und STAUDINGER, U. M. (Hrsg.): *Gewonnene Jahre: Empfehlungen der Akademiengruppe Altern in Deutschland. Altern in Deutschland Bd. 9. Nova Acta Leopoldina Band 107, Nr. 371*
- MARGRAF, J., und SCHNEIDER, S. (Hrsg.): *Lehrbuch der Verhaltenstherapie, Band 1–4 (4. Aufl.)*. Berlin, Heidelberg: Springer 2018
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina* (Hrsg.): *Frühkindliche Sozialisation: Biologische, psychologische, linguistische, soziologische und ökonomische Perspektiven (1. Aufl.)*. Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung. Berlin: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2014
- Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina*: *Traumatisierte Flüchtlinge – schnelle Hilfe ist jetzt nötig*. Halle/Saale: Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina 2018
- RAU, R., und BUYKEN, D.: Der aktuelle Kenntnisstand über Erkrankungsrisiken durch psychische Arbeitsbelastungen. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie A&O* 59/3, 113–129 (2015), <https://doi.org/10.1026/0932-4089/a000186>
- RÖSLER, F.: Ethikvoten in der psychologischen Forschung. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 6 (2019)
- SCHMITT, N.: Personality and cognitive ability as predictors of effective performance at work. *Annual Review of Organizational Psychology and Organizational Behavior* 1, 45–65 (2014)
- STRÖBE, W.: Gäbe es in Deutschland einen Markt für genetisch veränderte Nahrungsmittel? Eine sozialpsychologische Analyse. *Nova Acta Leopoldina NF Nr. 418*, 43–62 (2019)

Prof. Dr. Frank RÖSLER
Universität Hamburg
Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft
Abteilung für Biologische Psychologie
und Neuropsychologie
Von-Melle-Park 11
20146 Hamburg
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 404 28388091
E-Mail: frank.roesler@uni-hamburg.de

Natur als Herausforderung in einer modernen Gesellschaft

Ernst-Ludwig WINNACKER ML (München)

Die uns umgebende Natur war und ist uns Menschen ständige Herausforderung. Bleiben wir einmal bei dem Thema Ernährung und Landwirtschaft. Die letzten Hungersnöte gab es in Mitteleuropa in der Mitte des 19. Jahrhunderts. Man denke nur an die Aufstände der schlesischen Weber in und um 1847 oder die Kartoffelfäule in Irland, die um die gleiche Zeit etwa eineinhalb Million Iren das Leben kostete und ca. 1 Million zwang, nach Amerika auszuwandern.

Das Problem wurde von Justus VON LIEBIG gelöst. Er erkannte, dass mit einer Ernte den Böden Mineralstoffe entzogen werden, die auch das Verstreuen von Gülle nicht ersetzen kann. Er erfand die Mineraldüngung; durch Zusatz von Spurenelementen, vor allen Dingen aber Nitraten und Phosphaten erhöhten sich die Ernten damals schlagartig, bis gegen Ende des Jahrhunderts die Nitrate knapp wurden. Quelle von Nitraten waren in jener Zeit Vogelexkreme, sogenannter *Guano* oder Chilesalpeter, der über Jahrtausende hinweg von Millionen von Seevögeln an den Westküsten Chiles und Perus abgelagert worden war. Diese Lagerstätten neigten sich jedoch dank der riesigen Nachfrage dem Ende zu. Der Gedanke, den Stickstoff in der Luft, der in praktisch unerschöpflichen Mengen zur Verfügung steht, für die Zwecke der Landwirtschaft zu nutzen, war nicht neu. Er konnte jedoch erst durch Fritz HABER und Carl BOSCH in die Praxis, also zur Synthese von Ammoniak aus Luftstickstoff, umgesetzt werden. Das sogenannte Haber-Bosch-Verfahren ist technisch und energetisch extrem aufwendig. So wird heute geschätzt um die 2% aller auf dieser Welt eingesetzten Energie für diesen Prozess aufgewandt. Damit konnte eine für den Beginn der 1920er Jahre vorausgesagte Hungersnot abgewendet werden.

In der Folge gab es vor allen Dingen riesige Fortschritte auf dem Felde der Pflanzenzüchtung, darunter die Hybridzüchtung, die auch unter dem Namen „Grüne Revolution“ bekannt wurde.

Heute leben wir in einer Zeit der Lebensmittelüberschüsse. Lebensmittel aus aller Herren Ländern stehen uns in nahezu unbegrenzten Mengen zur Verfügung. Aber die Entwicklung ist nicht nachhaltig. Die moderne intensive Landwirtschaft mit ihren Monokulturen und ihrer Massentierhaltung ist exportgetrieben und zerstört die Artenvielfalt und die uns umgebende Natur. Der Raubbau, der derzeit an der Natur betrieben wird, ist eindrucklich. Die Zahl der Vögel geht massiv zurück. Es gibt kaum noch Insekten. Bienen sind in größter Gefahr. Der Nitratgehalt unserer Gewässer ist beängstigend hoch. Jedenfalls weist das Grundwasser in Deutschland im EU-Vergleich die zweithöchste Nitratbelastung auf. Die höchste gab es in Malta.

Die Suche nach den Schuldigen findet in der öffentlichen Diskussion nur zwei Beteiligte: die Dürre in diesem Sommer und die Gentechnik. Die Dürre ist nicht einfach nur eine Laune der Natur, mit der sich Landwirtschaft schon immer auseinandersetzen musste. Vielmehr fällt sie für mich und viele Kollegen unter das Stichwort menschengemachter Klimawandel. Wie man dem Klimawandel begegnen könnte, ist lange bekannt, aber es geschieht nichts.

Die Gentechnik ist ein merkwürdiger Angeklagter. Gentechnik im Freiland gibt es hier nicht. In unserem Lande ist nämlich der Einsatz von gentechnisch veränderten Nutzpflanzen verboten, oder sagen wir lieber *de facto* verboten. Dennoch ist sie vielen Verbrauchern und NGOs ein Dorn im Auge. Selbst der Europäische Gerichtshof (EuGH) hält sie für zu unsicher, obwohl es für Sicherheitsmängel keinerlei Indizien gibt. Gentechnik ist ein wunderbares Beispiel für die Führung eines Stellvertreterkrieges. Man nutzt das Bauchgefühl vieler Verbraucher, die die Dinge nicht verstehen können und wollen, um die intensive Landwirtschaft zu diskreditieren. Das mag ein hehres Ziel sein, aber die Gentechnik, die es gar nicht gibt, hier als Schuldigen auszumachen, ist ein starkes Beispiel für *Fake News*.

Wer ist denn dann der Schuldige, wenn nicht die Gentechnik, die es nicht sein kann? Es sind vor allem die deutschen Verbraucherinnen und Verbraucher. Er oder sie ist gegen Massentierhaltung, kauft aber im Supermarkt Hühnchen für weniger als drei Euro. Er oder sie lassen sich durch das Attribut „regional“ verführen, obwohl die Kirschen aus Chile oder die Steaks aus amerikanischen Rindern zwar für die chilenischen oder amerikanischen Verbraucher mit Recht als „regional“ vertrieben werden, es aber im wohlverstandenen Interesse der deutschen Verbraucher, wenn sie denn hier in Deutschland vertrieben werden, natürlich nicht sind. „Lokal“ wäre vielleicht ein ehrlicheres Attribut.

Die Natur ist ein komplexes System. Unsere Gesellschaft will das nicht wahrhaben und reduziert das Geschehen auf Dinge, die ihr einen einfachen Ausweg erlauben. Die industrialisierte Bauernlobby verlangt wegen der Dürre des vergangenen Sommers Geld, sehr viel Geld. Die Verbraucher sind nur allzu bereit, es ihr hinterherzuwerfen, obwohl es alternative Strategien gäbe, der schwierigen Problematik des Klimas Herr zu werden. Die diversen Alternativen, wie der Kohleausstieg oder die nachhaltige Landwirtschaft, sind aber sehr viel schwieriger durch- und umzusetzen. *In summa*: Das Verhältnis unserer Gesellschaft zur Natur ist extrem gestört. Vielleicht ist es die Aufgabe von uns Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern immer wieder darauf hinzuweisen.

Prof. Dr. Dr. h. c. Ernst-Ludwig WINNACKER
Genzentrum München und Department für Biochemie
Ludwig-Maximilians-Universität München
Feodor-Lynen-Straße 25
Raum A0.72
81377 München
Bundesrepublik Deutschland
Tel.: +49 89 218076734
E-Mail: elwinnacker@gmail.com

ISSN: 0369-5034

ISBN: 978-3-8047-3992-5