



SPEKTRUM

Das Wissenschaftsmagazin der Universität Bayreuth ■ 17. Jahrgang ■ Ausgabe 1 ■ Oktober 2021

THEMA

Ungewissheit

NATUR & TECHNIK

Klimaforschung in der Arktis

SEITEN 30-35

WISSEN & ENTSCHEIDEN

Mobilität in der Pandemie

SEITEN 54-57

GESELLSCHAFT & ÖKONOMIE

Flexibilisierung der Energiesysteme

SEITEN 76-79



Liebe Leserinnen und Leser,



■ Prof. Dr. Stefan Leible, Präsident der Universität Bayreuth.

In den vorigen Ausgaben unseres Wissenschaftsmagazins SPEKTRUM haben wir Ihnen Forschungskompetenzen der Universität Bayreuth auf wichtigen Zukunftsfeldern vorgestellt: Batterien, Wasserstoff, Lebensmittel und Ernährung, Gesundheit und Biomedizin. In diesen und vielen weiteren Bereichen hat sich die interdisziplinäre Forschung auf unserem Campus das Ziel gesetzt, neue Entwicklungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft kreativ und verantwortungsbewusst mitzugestalten.

Gleichzeitig ist Ungewissheit überall präsent: Sie kann Verunsicherung und Befürchtungen erzeugen, aber noch mehr ist sie Inspiration und Ansporn für innovative Ideen und Forschungsvorhaben. Die neue SPEKTRUM-Ausgabe führt uns an ausgewählten Beispielen vor Augen, wie sich verschiedene Disziplinen mit den Ursachen und Folgen von Ungewissheit, Unsicherheit und Irrtumswahrscheinlichkeit auseinandersetzen. So will beispielsweise eine europäische Initiative in den Naturwissenschaften das drängende Problem überwinden, dass veröffentlichte Forschungsergebnisse oft nicht reproduziert werden können; die Energieforschung arbeitet an zukunftsweisenden Konzepten für eine sichere und zugleich klimafreundliche Stromversorgung; in den Rechtswissenschaften wird die Frage diskutiert,

ob und wie die Gesetzgebung auf neue technologische Möglichkeiten reagieren sollte.

Immer deutlicher zeichnet sich ab, dass Wissenschaft gerade dann erfolgreich ist und einen nachhaltigen Nutzen für die Gesellschaft hat, wenn sie sich kritisch und selbstbewusst auch dem Thema „Ungewissheit“ stellt. Nur so wird sie in der Öffentlichkeit das Vertrauen gewinnen und festigen können, das für eine wissenschaftsbasierte, technologisch hochentwickelte Gesellschaft unabdingbar ist. Die Universität Bayreuth wird sich daher auch in Zukunft gemeinsam mit ihren Partnern im In- und Ausland für eine offene Kommunikation über wissenschaftliche Herausforderungen, die Inhalte und Ziele eigener Forschungsvorhaben sowie über die möglichen Folgen der dabei gewonnenen Erkenntnisse einsetzen.

Es grüßt sie herzlich,

Ihr

Prof. Dr. Stefan Leible
Präsident der Universität Bayreuth

Weitere SPEKTRUM-Ausgaben

Auf der Homepage der Universität Bayreuth finden Sie unter anderem auch die vorigen SPEKTRUM-Ausgaben zu den folgenden Themen:

- 2/2020: Life Sciences
- 1/2020: Wasserstoff
- 2/2019: Afrika
- 1/2019: Batterien
- 2/2018: Krieg
- 1/2018: Planet Erde
- 2/2017: Nachhaltigkeit
- 1/2017: Governance
- 2/2016: Molekulare Biowissenschaften

- www.uni-bayreuth.de/de/universitaet/presse/spektrum

Diese Ausgabe unseres Wissenschaftsmagazins SPEKTRUM hat einen auf den ersten Blick ungewöhnlichen Schwerpunkt: Während in der Regel Erkenntnisfortschritte, Innovationen und wegweisende Forschungsvorhaben im Fokus stehen, soll es diesmal um „Ungewissheit“ gehen. Das Thema lag nicht allein deshalb nahe, weil die Covid-19-Pandemie und ihre Folgen in weiten Teilen der Öffentlichkeit Verunsicherung und Misstrauen hervorgerufen haben. Hinzu kam die Beobachtung, dass die Institutionen der Wissenschaft seitens der Verantwortlichen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft immer öfter als Partner bei der Entwicklung tragfähiger Zukunftskonzepte wahrgenommen und auch in Anspruch genommen werden.

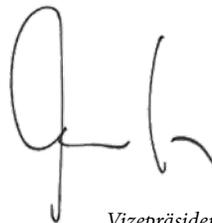
Die folgenden Beiträge zeigen an Beispielen aus ganz unterschiedlichen Disziplinen, dass Wissenschaft und Forschung es geradezu täglich mit Ungewissheit zu tun haben: Bewährte Verfahren stoßen an Grenzen, ungelöste Fragen behindern den Erkenntnisfortschritt, gesellschaftliche Erwartungen an eine vermeintlich umfassende Problemlösungskompetenz erweisen sich als unerfüllbar. Die in den Monaten der Pandemie gelegentlich zu hörende Forderung, die Politik solle „der Wissenschaft folgen“, stärkt die falsche Vorstellung, Wissenschaft sei ein einheitlich strukturiertes System und verfüge über endgültige Erkenntnisse, die geeignet seien, Ent-

scheidungsträger von der Schwere ihrer Verantwortung zu entlasten. Tatsächlich aber ist Wissenschaft im Kern ein offener vielstimmiger Prozess, der von Ungewissheit, Zweifeln, Kontroversen und Irrtümern wesentlich vorangetrieben wird.

Daher enthält diese SPEKTRUM-Ausgabe auch Beispiele dafür, dass Wissenschaft sich nicht darauf beschränkt, Ungewissheit mit den ihr zu Gebote stehenden Methoden und Instrumenten überwinden zu wollen. Ebenso wichtig scheint ihr Potenzial, rational begründete, ethisch verantwortbare und zugleich praktikable Verfahren für den Umgang mit – möglicherweise unaufhebbarer – Ungewissheit entwickeln zu können. Vieles spricht dafür, dass Wissenschaft gerade auch in dieser Hinsicht für eine gedeihliche Zukunft unentbehrlich ist.

Mit besten Grüßen,

Ihr



Prof. Dr. Martin Huber
Vizepräsident der Universität Bayreuth
für den Bereich Lehre und Studierende



■ Prof. Dr. Martin Huber ist Inhaber des Lehrstuhls für Neuere deutsche Literaturwissenschaft an der Universität Bayreuth.

IMPRESSUM

SPEKTRUM-Magazin der Universität Bayreuth

Auflage:

deutsche Ausgabe: 1.500 Stück
englische Ausgabe: 500 Stück

Herausgeber:

Universität Bayreuth
Stabsabteilung Presse, Marketing
und Kommunikation (PMK)
95440 Bayreuth
Telefon (09 21) 55 - 53 56 / - 53 24
pressestelle@uni-bayreuth.de

Redaktionsleitung:

Christian Wißler (V.i.S.d.P.)

Druck:

bonitasprint gmbh, Würzburg

Satz und Layout:

GAUBE media agentur, Bayreuth
www.gaube-media.de

Bildquellen-Kennzeichnung:

ist: www.istockphoto.com



■ Christian Wißler M.A.,
Fachwirt Public Relations (BAW),
Stabsabteilung PMK
der Universität Bayreuth,
Wissenschaftskommunikation.

Alle Beiträge sind bei Quellenangaben und Belegexemplaren frei zur Veröffentlichung.

■ Foto Titelseite: narvikk / ist.

■ Abb. links: Die Skulptur "you are free" von Robert Kessler auf dem Campus der Universität Bayreuth (Foto: Christian Wißler).

■ Luftbild Rückseite: Blick auf das Campusrondell der Universität Bayreuth (Foto: © Christian Bay).

Ungewissheit

- 2 Grußwort**
Prof. Dr. Stefan Leible
Präsident der Universität Bayreuth
- 3 Editorial**
Prof. Dr. Martin Huber, Vizepräsident
der Universität Bayreuth für den
Bereich Lehre und Studierende
- 3 Impressum**



Biomminerale können dem Design innovativer Funktionsmaterialien wichtige Impulse geben (Foto: ist).

- 30 Licht ins ungewisse Dunkel der Polarnacht bringen**
Der arktischen Verstärkung des Klimawandels auf der Spur
- 36 Technische Systeme sicher auslegen**
Berechnung und Simulation machen Ungewissheiten beherrschbar
- 42 Unsicherheiten in Batteriesystemen**
Von den Materialien über die Herstellung bis zum Betrieb



Die "reproducibility crisis" betrifft heute verschiedenste Disziplinen der Naturwissenschaften (Foto: ist).

Wissen & Entscheiden

- 46 Mehr Daten, weniger Ungewissheit?**
Datenmodelle als Schlüssel zum Wissensgewinn



Eine neue Studie hat Gründe für unterschiedliche Verhaltensanpassungen in der Pandemie untersucht (Foto: ist).

Aufbruch in der Neuzeit

- 6 Neue Ungewissheiten**
Das Zeitalter der „Entdeckungen“



Europäisches Wissen über die Welt, das sich in der Frühen Neuzeit herausbildete, geht zu einem hohen Anteil auf außereuropäische Quellen zurück (Foto: ist).

Natur & Technik

- 10 Kreative Ungewissheit**
Zur Physik der Selbstorganisation lebender Systeme
- 14 Wissenschaft in der Krise?**
Eine europäische Initiative entwickelt Lösungsansätze
- 20 Forschen nach dem Rezeptbuch der Natur**
Von biogenen Mineralien zu neuen Energiematerialien
- 26 Vom wissenschaftlichen Umgang mit Ungewissheit**
Ein Rückblick auf die 70. Lindauer Nobelpreisträgertagung

- 50 Der Ungewissheit ausgeliefert?**
Wie wir bessere statt schlechtere Entscheidungen treffen können
- 54 Mobilität in der Pandemie**
Risikopräferenzen steuern Verhaltensanpassungen



■ *Wissenschaftlicher Forschung ist immer nur ein sehr begrenzter Ausschnitt des Universums zugänglich, vgl. S. 26-29 (Foto: ist).*



Damit Produkte hohe Sicherheitsstandards erfüllen, sind Simulationen unabdingbar (Foto: ist).

Gesellschaft & Ökonomie

- 58 Krieg, Flucht, Vertreibung**
Ungewissheit in der Grenzregion zwischen Tschad und Sudan
- 64 Sicherheit und Unsicherheit in der globalen Ökonomie**
Zur Externalisierung von Kosten und Risiken in den Globalen Süden
- 70 Corporate Digital Responsibility**
Wie die Kommunikation über Werte Vertrauen in die digitale Transformation sichert
- 76 Flexibilität in Zeiten zunehmender Unsicherheit**
Ein Plädoyer für den Ausbau nachhaltiger und flexibler Energiesysteme

Gesellschaft & Recht

- 80 Vom Umgang mit Ungewissheit in der Gesetzgebung**
Zur Regulierung gentechnisch veränderter Organismen in der EU
- 84 Ungewissheit im Recht**
Vom Feststellbaren und Festzustellenden



Verstanden als Unsicherheit über das Geschehene, prägt epistemische Ungewissheit die juristische Praxis (Foto: ist).



Flexibilisierung ist der Schlüssel zu nachhaltigen Energiesystemen der Zukunft (Foto: ist).



Globale Liefer- und Investitionsketten können Unsicherheit im Globalen Süden erzeugen (Foto: ist).

- 89 Zur Rationalität juristischer Argumentationen**
Interview mit Prof. Dr. Carsten Bäcker
- 90 Der Tod ist sicher, das Sterben nicht**
Eine soziologische Einordnung der Patientenverfügung

Politik in der Pandemie

- 94 Irrtumsfähigkeit und Verantwortung**
Zum Verhältnis von Politik und Wissenschaft



■ Susanne Lachenicht

Neue Ungewissheiten

Das Zeitalter der „Entdeckungen“

Im Jahr der Nuklearkatastrophe von Tschernobyl, 1986, machte ein Buch eines deutschen Soziologen Furore: „Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne“ von Ulrich Beck (1944-2015). Der Autor konstatierte hier einen Bruch in der Moderne infolge von Veränderungen in der Industriegesellschaft, die sich angesichts neuer Risiken fundamental wandle. Diese zweite, reflexive Moderne bringe eine „Logik der Risikoproduktion“ hervor: Die technisch-ökonomische Entwicklung habe Risiken wie Umwelt- und Klimaprobleme, aber auch soziale Probleme zur Folge. Was jedoch als Risiko wahrgenommen werde, sei immer das Ergebnis von gesellschaftlichen Konstruktionsprozessen.

Kritiker haben Ulrich Beck entgegengehalten, dass es Risikoproduktion und Strategien im Umgang damit in

■ Ferdinand Magellans Schiff „Victoria“, Detail aus einer Weltkarte von Abraham Ortelius (1527-1598) (Quelle: wikimedia commons / www.helmink.com / CC-PD-Mark).

allen Gesellschaften gegeben habe, ausgelöst durch Naturkatastrophen, imperiale Expansion oder neue Technologien. Tatsächlich haben alle Gesellschaften mit Risiken und daraus resultierenden Ungewissheiten zu kämpfen gehabt, wenn auch in unterschiedlichem Maß und nicht immer mit globalen Reichweiten.

Eine Epoche der großen Ungewissheiten war nicht zuletzt auch die Zeit ab etwa 1400, die wir in europäischer Perspektive als Zeitalter der Renaissance, der Reformation und der „Entdeckungen“ bezeichnen. Nicht zuletzt mit den Kreuzzügen hatten sich Kontakte christlicher Europäer mit muslimischen und christlichen Arabern, mit Juden, Griechen, Persern oder Byzantinern, mit Mameluken, Sarazenen und Osmanen im Osten Europas intensiviert. Auf der iberischen Halbinsel mündete der Kreuzzugsgedanke in die Reconquista, die christliche Rückeroberung der iberischen Halbinsel aus maurischer Hand. Damit verbunden war die Conquista, d.h. die Eroberung von Teilen von Nordafrika, der Kanaren, der Azoren und Madeiras. Neue und alte Wissenswelten, die sogenannte Wiederentdeckung der Antike wie auch die Konfrontation mit Wissenswelten anderer Gesellschaften, mit neuen Technologien – all dies stellte scheinbar feste Welterklärungsmodelle der westlichen Christenheit grundlegend in Frage.

Die Erklärung der Welt mit Hilfe von Texten der griechischen und römischen Antike, mit Hilfe der Bibel, und hier vor allem des Alten Testaments, geriet aber vor allem durch die „Entdeckung“ Amerikas ins Wanken. Dass es jenseits der Säulen des Herakles, wie die Straße von Gibraltar genannt wurde, dass es jenseits der einen Welt Gottes, bestehend aus Europa, Asien und Afrika, eine weitere Welt, einen eigenen Kontinent, eine weitere Hemisphäre geben sollte, schien unfassbar. Da man lange die westliche Ausdehnung Amerikas nicht kannte, wurde auch immer wieder die Überlegung in den Raum gestellt, dass es sich vielleicht doch nur um Inseln handle, die zum chinesischen Reich gehören. Doch die Erkundung der Küstenlinie von Labrador bis nach Feuerland, spätestens die Weltumsegelung Ferdinand Magellans 1520/21 brachte Gewissheit: Hier lag ein riesiger, unbekannter Kontinent, den die Alten in ihren Schriften nicht gekannt zu haben schienen. Historiker wie der an der Princeton University lehrende Anthony Grafton oder der an der University of California at Los Angeles arbeitende Anthony Pagden haben diese Erfahrung als „shock of discovery“ bezeichnet. Die Welt musste aus Sicht der Europäer neu geordnet werden, neben den alten Ungewissheiten kamen neue in nie gekannten Dimensionen hinzu.



Unbekannte Welten – Risiken und Spekulation

Auf dem Weg in unbekannte neue Welten bestand Ungewissheit bezüglich der Winde und Strömungen, die die Europäer auf ihren Segelschiffen vielleicht in ferne Gegenden bringen, ihnen aber die Heimkehr verwehren würden; neue Klimazonen, Landschaften, Kulturen brachten neue Risiken. Quellen aus dem Zeitalter der Entdeckungen dokumentieren, dass sich die Fürsten Europas der Risiken, die Seefahrer in ihrem Auftrag zur Erkundung eines Seewegs nach Westen und zur Eroberung von neuem Land eingingen, durchaus bewusst waren. Belohnt wurden die Conquistadores, Freibeuter, Eroberer durch Patente, die ihnen die Fürsten für Länder ausstellten, über deren Ressourcen sie gar keine Verfügungsmacht hatten: So wurden Christopher Columbus 1492 von Isabella von Kastilien die Rechte eines Admirals, Vizekönigs und Gouverneurs über all die Regionen verliehen, die er auf seiner Reise besuchen würde und die – nach Ermessen vieler Gelehrter der Zeit – eigentlich in den Herrschaftsgebieten des Großkhans von China hätten liegen müssen. Ähnlich wie Columbus wurde auch der Venezianer Giovanni Caboto 1496, in diesem Fall durch König Heinrich VII. von England, beauftragt, neues Land in Besitz zu nehmen. Cabotos Bereitschaft, dafür unvorstellbare Risiken in Kauf zu nehmen, Fortuna herauszufordern und sich in Gottes Hand zu begeben, wurde wie folgt belohnt: Caboto bekam das Recht “[to] subdue, occupy and possess all such townes, cities, castles and isles of them found, which they can subdue, occupy and possess” und “be holden and bounder of all the fruits, profits, gaines, and commodities growing of such navigation.”¹ Ungewissheit, Risikobereitschaft waren im Zeitalter der Entdeckungen damit in vielen

■ Abb. 1: Zwei Felsenberge markieren die Straße von Gibraltar: der Felsen von Gibraltar im Süden der Iberischen Halbinsel (links im Vordergrund) und der Berg Dschebel Musa auf nordafrikanischer Seite. Sie wurden seit der Antike als „Säulen des Herkules“ bezeichnet. Der griechischen Überlieferung zufolge installierte Herakles hier die Inschrift „Nicht mehr weiter“ (lateinisch: „Non plus ultra“), als sichtbares Zeichen für das Ende der Welt. Unter Kaiser Karl V., der auch König der Las Hispanas war, wurden zwei Säulen mit dem entgegengesetzten Wahlspruch „Plus Ultra“ in das spanische Wappen aufgenommen und markierten so einen weltumspannenden Herrschaftsanspruch (Foto: wikimedia commons / Hansvandervliet / PD-self; Wappen: wikimedia commons).

■ Abb. 2: Vespucci entdeckt America. Kupferstich von Theodor Galle (1571-1633) nach einer Allegorie von Johannes Stradanus (Jan van der Straet, 1523-1605) (Quelle: wikimedia commons / CC-PD-Mark).



1 Richard Hakluyt: Principale Navigations. London 1509.

„Die Welt musste aus Sicht der Europäer neu geordnet werden, neben den alten Ungewissheiten kamen neue in nie gekannten Dimensionen hinzu.“

dieser Patente mit dem Recht auf die Ausbeutung von Land, Ressourcen und Menschen in den für die Europäer neuen Welten verbunden, ungeachtet der Rechte der dort bereits lebenden Menschen.

Den Risiken der Entdeckungsfahrten, der Eroberungs- und Kolonisationsversuche, von denen viele scheiterten, begegneten Europäer auf vielfältige Weise: Die Finanziere verbesserten die bereits im Mittelmeerraum verbreiteten Versicherungssysteme und nutzten für die Kalkulation finanzieller Risiken unter anderem die Wahrscheinlichkeitsrechnung, für die Blaise Pascal (1623-1662) und Pierre de Fermat

(1607-1665) im 17. Jahrhundert wichtige Grundlagen schufen. Risiken, die durch Stürme, Piraterie, Schiffsunglücke, Meutereien und Angriffe seitens anderer imperialer europäischer Mächte oder indigener Bevölkerungen bestanden, sollten vor allem die Finanziere in Europa selbst absichern. Hier ging es darum, Risiken unter Kontrolle zu bringen, Unsicherheit durch kalkulierbare Risiken zu ersetzen.

Gleichzeitig brachte die Konfrontation der Europäer mit den für sie neuen Welten etwas hervor, was die Forschungsgruppe „Cultures of Speculation“ an der Universität Bayreuth und der University of California at Davis als „affirmative Spekulation“ bezeichnet: philosophische und theologische Schriften sowie literarische Produktionen in Form von fiktionalen und realen Reisebeschreibungen, Parodien, Satiren und phantastischen Erzählungen. Diese Werke erzählten von realen und surrealen Risiken und Ungewissheiten, oder sie hielten den Gesellschaften ihrer Zeit den Spiegel (*speculum*) vor. Gleichzeitig entwarfen sie – mal seriös, mal entschieden unseriös – potentiell neue Welten. Es ging um mehr als darum, Risiken unter Kontrolle zu bringen, sie kalkulierbar zu machen. Die Unsicherheiten des Neuen brachten noch mehr Neues, noch mehr Mögliches, Potentielles, aber auch die Spekulation über unmögliche oder nicht erwünschte Welten hervor. In vielen satirischen Schriften wurden die darin erzählten fiktiven Ereignisse von ihren Autoren an einen „Unort“ (*utopia*) verbannt, wo sie außerhalb des realen Geschichtsverlaufs in einer „Nicht-Zeit“ spielten. Sie wurden als nicht wünschenswerte Projektionen von Gesellschaft benannt. Aber für ein späteres Lesepublikum wurden Inhalte dieser Schriften zu einer zukunftssträchtigen Vision: Vorstellungen von Gemeineigentum inspirierten im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert Frühsozialisten zu neuen gesellschaftlichen Experimenten sowie zu revolutionären Forderungen und Bewegungen, insbesondere zur Zeit der Französischen Revolution oder der europäischen Revolutionen von 1830 und 1848. Ähnliches gilt für manche literarische Satiren der Renaissance- und Barockzeit: Zu ihrer eigenen Zeit waren sie „revolutionär“, wenn sie beispielsweise demokratische Rechte für alle oder die Gleichheit von Mann und Frau imaginierten. Erst in späteren Epochen wurden Ideen aus diesen Literaturen aufgenommen und nach langen Kämpfen in Realität umgesetzt.



■ Abb. 3: Cyrano hebt mithilfe von runden, mit Tautropfen gefüllten und von der Sonne erwärmten Flaschen von der Erde ab, um zum Mond zu schweben. Statt auf dem Mond landet er allerdings in Quebec, in Neu-Frankreich. Illustration aus dem zweiten Band der 1708 in Amsterdam gedruckten Gesamtausgabe der Werke von Savinien de Cyrano de Bergerac (1619-1655) (Quelle: wikimedia commons / CC-PD-Mark).

Der Ungewissheit zugewandt

In der Geschichts-, Kultur- und Literaturwissenschaft wird im Kontext von Risikoforschung bzw. in der Analyse der „Cultures of Speculation“ der Begriff der „affirmativen Spekulation“ verwendet:

“Affirmative speculation is founded on a paradox: it functions and thrives by concerning itself with an uncertainty that must not be reduced to manageable certainties. By definition, affirmative speculation lives by thinking in the vicinity of the unthinkable (...) As a mode of radical experimentation with the future, it experiments with those futures that are already here and now and yet are different from the here and now. Paradoxically, in affirmative speculation – and hence at a moment of potent self-affirmation – what we affirm is something that has the potential to undo us: this is not, in other words, a self-congratulatory affirmation of what we are; it is, rather, an affirmation of what we might become.”

Uncertain Commons: Speculate This!, Durham 2013, 72.

Als analytischer Begriff ist er für eine Vielzahl literarischer Werke der Frühen Neuheit nützlich, die zwischen Gewissheiten und Ungewissheiten, Vergangenheit, Gegenwart, Nicht-Zeit und Zukunft, Realität und Imagination, Ernst und Satire, alter europäischer Welt und nicht-europäischen Welten oszillieren oder ihrer Gegenwart einen (Zerr-)Spiegel vorhalten und neue Welten vorstellbar machen:

- Amerigo Vespucci: *Mundus novus* (1504)
- Thomas Morus: *Utopia* (1516)
- Tommaso Campanella: *La città del sole* (1623)
- Francis Bacon: *The New Atlantis* (1627)
- Cyrano de Bergerac: *Les États et Empires de la Lune* (posthum 1657) und *Les États et Empires du Soleil* (posthum 1662)
- Jonathan Swift: *Gulliver's travels* (1726)



Außereuropäische Quellen der „Neuen Wissenschaften“

Den Ungewissheiten neuer Welten begegneten Europäer aber auch mit dem, was als Neue Wissenschaften bezeichnet wird. Es sind Versuche, Gottes Welt in ihrer Ordnung und damit die Naturgesetze besser zu verstehen – nicht zuletzt, um sich im Sinne des Alten Testaments die Erde besser untertan machen zu können. So schrieb Francis Bacon 1620 in seiner „Instauratio magna“ über die Neuen Wissenschaften: „[it] could affect the course of nature in useful ways, knowledge about how to ward off disease, improve crops, extend the span of life, and enhance the general welfare“².



Bei der Kartographierung, der besseren Kenntnis von Klima, Umwelt, Geologie und Geographie, Botanik, Zoologie, Gesellschaften und ihren kulturellen Praktiken waren die Europäer in allen Regionen der Welt vor allem auf das Wissen derjenigen angewiesen, die sie durch Kolonisation langfristig gewaltsam unterwarfen oder mit denen sie Handel trieben. Die Wissensgeschichte und Wissenschaftsgeschichte hat diesen Zusammenhang in den letzten Jahren an vielen Beispielen empirisch nachgewiesen: Europäisches Wissen über die Welt, wie es sich in Akademien und Universitäten, Enzyklopädien, Reiseberichten und Naturbeschreibungen, gelehrten Journalen, Museen, Bibliotheken und Archiven findet, geht zu einem hohen Anteil auf Wissenswelten und Wissenssysteme nicht-europäischer und nicht-christlicher Wissensträger*innen zurück. Was diese Wissensträger*innen über ihre eigenen, von den Europäern vielfach gewaltsam unterworfenen Welten wussten, teilten sie – oft unter Zwang – eben diesen Kolonisatoren mit, so dass sie zu „Go-between“ zwischen den Wissenswelten wurden. Das von ihnen übermittelte Wissen wurde im Kontext von Kolonisation und Aufklärung zu europäischem Wissen über die Welt deklariert. Es korrigierte zusammen mit den empirischen Erfahrungen der Europäer*innen das Wissen, das diese über die Welt zu haben glaubten. So stellte sich beispielsweise heraus, dass Plinius der Ältere in seiner lange als gültig anerkannten *Naturalis historia* (um 77 n. Chr.) nur in Teilen recht gehabt hatte, was seine Beschreibung der Welt und ihrer Flora und Fauna anging. Nicht nur trafen Europäer nicht die von Plinius beschriebenen Monster, Meerjungfrauen, Kopffüßler und andere Wesen an den Rändern der Welt, sondern es gab ganz andere, nie erwartete seltsame Wesen wie Ameisenbären, Faultiere oder Kiwis. In oft verballhornten Namen für Regionen, Landschaften, Flüsse, Naturphänomene, Pflanzen und Tieren finden sich noch Spuren jenes Wissens, das die „Go-between“ in europäische Wissenswelten eingebracht haben. In der Pharmazie und Medizin, in neuen Methoden der Landwirtschaft und der Ökologie ist das von ihnen in außereuropäischen Kontexten gewonnene Wissen bis heute präsent.

Die Neuen Wissenschaften stellten jedoch zunehmend das infrage, woraus sie selbst hervorgegangen waren: jüdisch-christlich-muslimische Vorstellungen vom Beginn und dem Ende der Welt, wie Gott sie geschaffen hatte. Sie erschütterten die relative Sicherheit, die religiöse Welterklärungen bei allem Zweifel mit sich gebracht hatten; sie schufen neue Unsicherheiten und gleichzeitig eine neue Suche nach mehr Gewissheit über die Entstehung und den Verlauf der Welt.

■ Abb. 4 (links): Innenhof der Amsterdamer Börse, Gemälde von Emanuel de Witte (1617-1692) aus dem Jahr 1653 aus dem Museum Boijmans Van Beuningen, Amsterdam (Quelle: wikimedia commons / CC-PD-Mark).

LITERATURTIPPS

S. Lachenicht: *Histoires naturelles, récits de voyage et géopolitique religieuse dans l'Atlantique français; XVIe et XVIIe siècles*. *Revue d'Histoire de l'Amérique française* (2016) 69/4, 27-45 (Montreal). Ausgezeichnet mit dem Preis Guy et Liliane Frégault (Montreal).

S. Lachenicht: *How the Americas Came to Be Known as 'the Americas'. A Historical Approach to the Western Hemisphere*, in: V. Depkat, B. Waldschmidt-Nelson (eds.): *Cultural Mobility and Knowledge Formation in the Americas*. Heidelberg 2019, 13-29.

S. Lachenicht: *Cultures of Speculation, Histories of Speculation*, in: J. Cortiel et al. (eds.): *Practices of Speculation. Modeling, Embodiment, Figuration*. Bielefeld 2020, 31-48.

2 Anthony Grafton et al. (eds.): *New Worlds, Ancient Texts. The Power of Tradition and the Shock of Discovery*. Cambridge/MA und London 1992, 197.

■ Abb. 5: Francis Bacon, Lord Chancellor of England. Porträt von Frans Pourbus d. J. (1569-1622) aus dem Jahr 1612 (Quelle: wikimedia commons / CC-PD-Mark).

AUTORIN



Prof. Dr. Susanne Lachenicht ist Inhaberin des Lehrstuhls für Geschichte der Frühen Neuzeit an der Universität Bayreuth.

NATUR & TECHNIK

■ Matthias Weiss

Kreative Ungewissheit

Zur Physik der
Selbstorganisation
lebender Systeme

■ Rebecca Benelli M.Sc., Doktorandin der Biophysik, untersucht den Aufbau von Embryonen des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* (Foto: Christian Wisfler).



Der Begriff „Ungewissheit“ hat im Alltag häufig negative Konnotationen, beispielsweise in Situationen, die als potentielle Bedrohungen des Status quo erlebt werden. In der Wissenschaft ist Ungewissheit hingegen unverzichtbar, um Neugier zu wecken und zur Erforschung von unbekanntem Territorium anzuspornen. Wissenschaft verringert, indem sie Wissen schafft, in der Folge die Ungewissheit und weitet die Grenzen menschlicher Gewissheiten aus, aber sie wirft dabei immer auch neue unvorhergesehene Fragestellungen auf. Bereits entwickelte Werkzeuge und etabliertes Wissen leiten das Vordringen ins Ungewisse und werden zugleich auch selbst in Frage gestellt. Die vermutlich berühmtesten Schritte ins Ungewisse, die mit einem gewaltigen Einsturz vorheriger Gewissheiten einhergingen, sind mit den Namen Max Planck und Albert Einstein verknüpft.

Ungewissheit ist aber nicht nur in diesem allgemeinen Sinne eine ständige Begleiterin und Antreiberin des wissenschaftlichen Fortschritts, sie ist auch im Laboralltag ständig präsent. Denn jedes Messsignal zeigt eine gewisse Variation, für die sich in der Forschung der Begriff „Fluktuation“ etabliert hat. In vielen Fällen ist sie den apparativen Grenzen der Messtechnik geschuldet. Ob und inwieweit anschließende quantitative Messungen Gewissheit schaffen können, ob Fluktuationen also eher Ungewissheiten verstärken oder sogar Einsichten fördern, hängt nicht zuletzt von ihren Ursachen ab. Wissenschaftlich besonders interessant sind Fluktuationen, die dadurch verursacht werden, dass sich der Messgegenstand (die Probe) dynamisch entwickelt. Derartige Fluktuationen verschwinden selbst bei einer perfekten Messtechnik nicht. Sie sind in allen Bereichen der Physik von enormer Bedeutung, weil sie tiefe Einblicke in die Entwicklung des jeweils untersuchten Systems ermöglichen.

Fluktuationen in lebenden Organismen

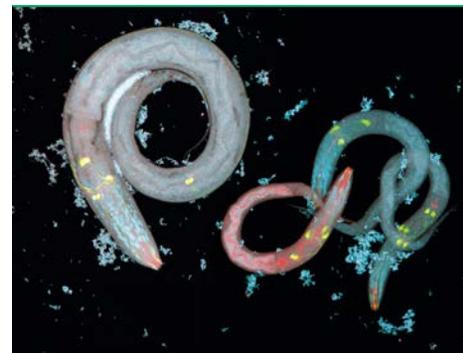
Im Fokus der Biophysik stehen oft Fluktuationen, an denen sich Transport- und Selbstorganisationsprozesse in lebenden Organismen ablesen lassen. Diese auf unterschiedlichen Längen- und Zeitskalen ablaufenden Prozesse sind nötig, um wesentliche Funktionen lebender Zellen aufrecht zu erhalten, und sie sind auch für die embryonale Entwicklung unentbehrlich. Zwar lässt sich oft, über viele individuelle Embryonen hinweg, ein „mittleres Verhalten“ vorhersagen. Doch wie die weitere Entwicklung im Detail aussehen wird, bleibt infolge der Fluktuationen teilweise ungewiss. So werden sich Menschen

hinsichtlich ihrer äußeren Gestalt im Großen und Ganzen immer recht ähnlich sein, doch Details wie die individuelle Augenfarbe – bis hin zu verschiedenfarbigen Augen, wie sie gelegentlich beim einzelnen Menschen vorkommen – sind größeren Schwankungen unterworfen.

Lebende Organismen sind vom thermischen Gleichgewicht weit entfernt, weil die aufgenommene Nahrung kontinuierlich in Bewegungsenergie oder Informationsverarbeitung umgesetzt wird. So entspricht die Menge des molekularen Energiespeichers Adenosintri-phosphat (ATP), die täglich im Körper eines erwachsenen Menschen ab- und wieder aufgebaut wird, ungefähr seinem Körpergewicht. Dabei wird das ATP-Molekül gespalten, zum Beispiel um die frei werdende Energie in Bewegung umzusetzen. Gleich darauf wird es aber mit Hilfe einströmender Nährstoffe von neuem gebildet, so dass die Masse des Körpers praktisch unverändert bleibt. Für jede menschliche Zelle bedeutet dies: In jeder Sekunde laufen zehn Millionen Zyklen der ATP-Spaltung und -Wiederherstellung ab! Es liegt nahe, die durch diese aktiven Prozesse bedingten Fluktuationen als eine Signatur lebender Systeme aufzufassen. Ungewissheit hat hier besondere, vielleicht sogar konstitutive Eigenschaften.

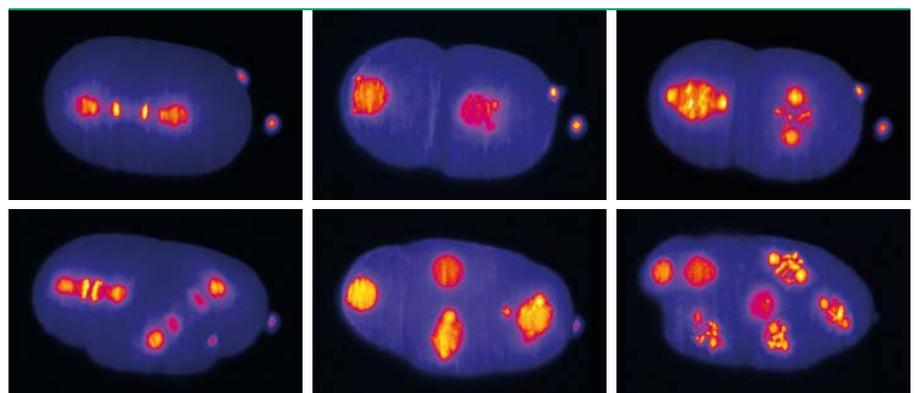
Mechanik kann Ungewissheiten im Embryo verringern

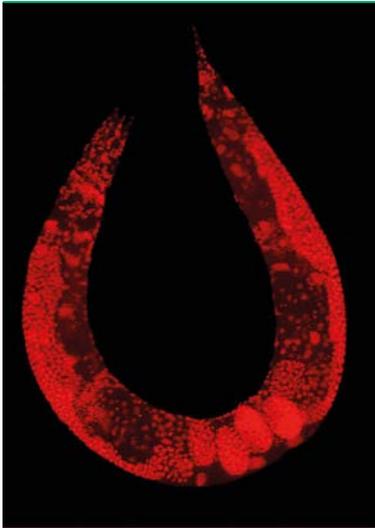
Im folgenden sollen beispielhaft einige Selbstorganisationsphänomene dargestellt werden, die im Verlauf der embryonalen Entwicklung auftreten und am Lehrstuhl für Experimentalphysik I der Universität Bayreuth untersucht werden. Diese Forschungsarbeiten verwenden einen etablierten und weit verbreiteten Modellorganismus: den rund einen Millimeter großen und transparenten Fadenwurm



■ Abb. 1: Fadenwürmer der Spezies *Caenorhabditis elegans*. Der Wurm erreicht eine Länge von rund einem Millimeter (ist/HeitiPaves).

■ Abb. 2: Maximum-Intensitäts-Projektionen von 3D-Bildern des frühen ungestörten Embryos von *C. elegans*. Die „Maximum Intensity Projection (MIP)“ ist ein Verfahren der Bildverarbeitung, das häufig auch für medizinische Diagnosen angewendet wird (Bilder: Matthias Weiss).





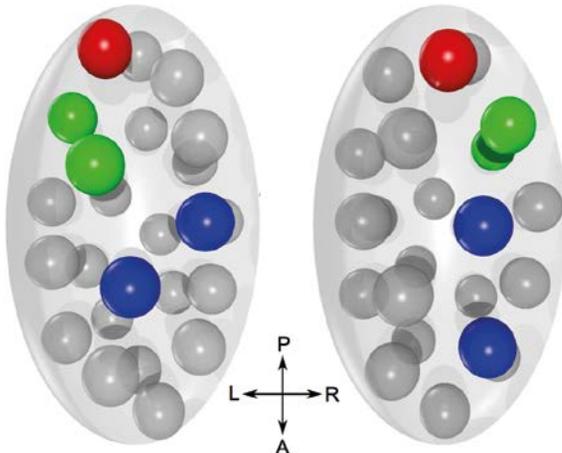
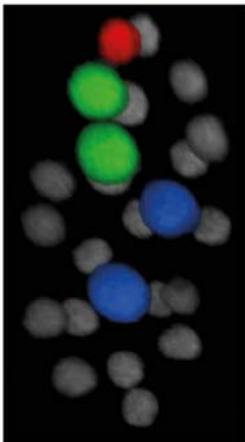
■ Abb. 3: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme eines Hermaphroditen des Wildtyps von *C. elegans*. Der Fadenwurm wurde zur Hervorhebung der Zellkerne mit einem fluoreszierenden DNA-Färbemittel behandelt (wikimedia commons / CC-BY-2.5).

AUTOR

Prof. Dr. Matthias Weiss ist Inhaber des Lehrstuhls Experimentalphysik I (Physik lebender Materie) an der Universität Bayreuth.



■ Abb. 4: Ungestörte Anordnung von Zellen in der ellipsoidal geformten Eizelle des Fadenwurms *C. elegans* (links). Sie stimmt mit der Computersimulation einer ungestörten Entwicklung des Embryos überein (Mitte). Wird jedoch eine gestörte Entwicklung simuliert, weicht die Verteilung davon ab (rechts) (Bilder: Matthias Weiss).



Caenorhabditis elegans. Das Genom von *C. elegans* ist seit langem vollständig entschlüsselt. Mittlerweile gibt es zahlreiche genetisch modifizierte Stämme dieses Wurms, die mit moderner Fluoreszenzmikroskopie – wie etwa der Lichtblatmikroskopie – beobachtet werden können. Das erwachsene Tier besitzt immer genau 959 somatische Zellen und ist in mehr als 99 Prozent der Fälle ein Hermaphrodit, der komplett autark rund 300 Nachkommen erzeugt. In einer schützenden Chitinhülle wächst dabei zunächst aus einer befruchteten Eizelle, der Zygote, eine Larve mit 558 Zellen heran. Schon nach den ersten drei Teilungen der Zygote sind dabei alle Körperachsen des späteren Wurms festgelegt: die Längsachse (Anterior-Posterior-Achse), die vom Rücken zum Bauch führende Achse (Dorsal-Ventral-Achse) und die Links-Rechts-Achse.

Die Lichtblatmikroskopie macht es möglich, die frühen Stadien der Embryogenese mit hoher Auflösung dreidimensional in ihrem zeitlichen Ablauf zu verfolgen. So kann man vor der ersten Zellteilung beobachten, dass sich im flüssigen Zellinneren der ellipsoidal geformten Zygote eine ungleiche Verteilung der Proteinsorten PIE-1 und MEX-5 herausbildet. PIE-1 und MEX-5 häufen sich an entgegengesetzten Zellpolen an. Von jetzt an definieren die biochemisch unterschiedlichen Zellpole die Längsachse des Wurms. Dabei ist die Anhäufung von PIE-1 die Grundlage für die spätere posteriore Zelle, den Vorläufer der Keimbahn.

Auf den ersten Blick scheinen diese Abläufe so eindeutig „vorprogrammiert“ zu sein, dass es darüber keine Ungewissheit zu geben scheint. Allerdings ist unklar, weshalb sich die beiden Proteinsorten überhaupt an gegenüberliegenden Zellpolen ansammeln. Zeigt nicht die Erfahrung, dass sich gelöste Stoffe gerne in einer Flüssigkeit durch Diffusion ver-

teilen, zum Beispiel die Milch im Kaffee? Die Lösung dieses Problems liegt in der Diffusionsbewegung der Proteine, die von Fluktuationen bestimmt ist. Mit der Fluoreszenz-Korrelationsspektroskopie kann man in hoher Auflösung erkennen, wie schnell sich die PIE-1- und MEX-5-Proteine in der Zygote bewegen.¹ Es zeigt sich, dass diese Proteine in den Bereichen ihrer jeweiligen Anhäufung langsamer diffundieren, in der Mitte der Zygote aber schneller werden. Aufgrund dieser experimentell gewonnenen Informationen kann man mittels einer vergleichsweise einfachen mathematischen Gleichung verstehen und vorhersagen, dass sich die beiden Proteine im Zytoplasma entmischen und an den Polen der Eizelle konzentrieren.

„Ungewissheit ist auch im Laboralltag ständig präsent.“

Ein noch tiefergehendes Verständnis dieser Strukturbildung in der Zygote kann man erreichen, wenn man die fluktuationsgetriebenen Bewegungen von Proteinen und ihre gegenseitig hemmende Wirkung mit Vorhersagen vergleicht, die der britische Physiker Alan Turing 1952 mathematisch-abstrakt formuliert hat: Fluktuationen und Diffusion bewirken unter bestimmten Bedingungen, dass entlang der Längsachse der Zygote ein Muster entsteht, zum Beispiel eine Anhäufung bestimmter Proteine an einem Zellpol. Die Klasse solcher Muster bezeichnen wir heute als „Turing-Muster“. Der spontane und selbstorganisierte Prozess, in dem sich die erste Körperachse des entstehenden Embryos herausbildet, zeigt somit beispielhaft, wie Ungewissheit im Sinne von Fluktuationen zu einer sich dynamisch stabilisierenden Ordnung führen kann.

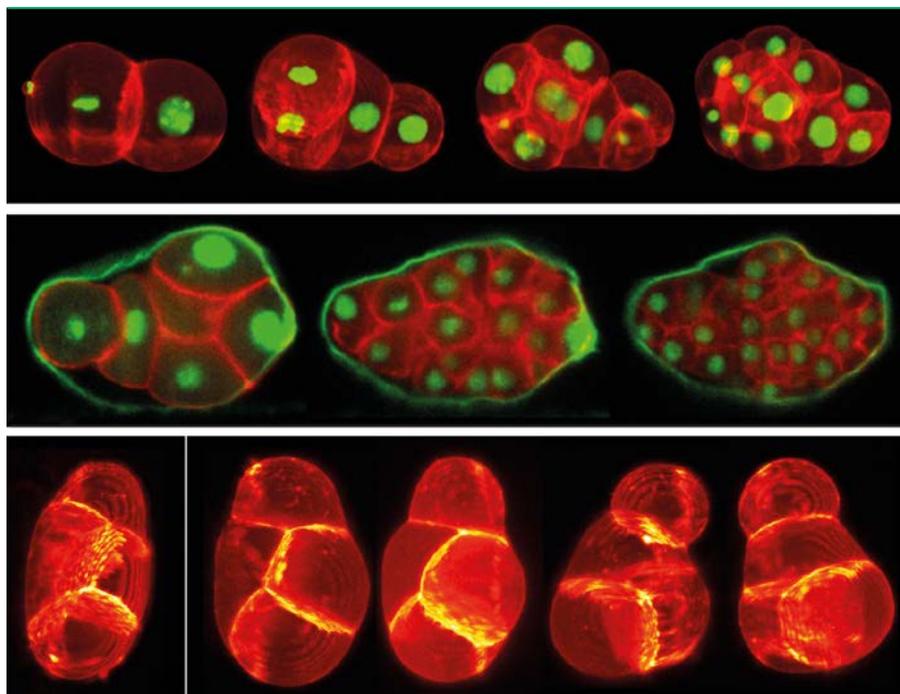
Auf größeren Längen- und Zeitskalen sieht man ausgehend von der Zygote von *C. elegans* eine Reihe von Zellteilungen, bei denen das embryonale Gesamtvolumen erhalten bleibt, während die Zellen in scheinbar vorherbestimmte Positionen rutschen. In diesem frühen Entwicklungsstadium des Wurms sieht es so aus, als sei der Organismus auf Autopilot gestellt. Freiheiten, sich alternativ zu entwickeln, und daraus resultierende Ungewissheiten sind scheinbar ausgeschaltet. Doch tatsächlich kann man bei einem Vergleich verschiedener Embryos immer noch leichte Abweichungen der Zellpositionen beobachten, auch wenn es eine dominante treibende Kraft zu geben scheint, die diese kleinen Ungewissheiten weitgehend überschreibt.

Wenn man die Positionen aller Zellen im sich entwickelnden Embryo über die Zeit bestimmt und dabei die ständig neu hinzukommenden Zellen einbezieht, kann man diese leitende Kraft mit Hilfe einfacher Modellsimulationen identifizieren: Es ist die Mechanik, die den Zellen diktiert, welche Position sie in der ellipsoidal geformten starren Chitinhülle einnehmen müssen. Jede Zelle sucht ihre Relaxationsposition auf, wo sie den geringsten Druck benachbarter Zellen und der Hülle verspürt.² Am augenfälligsten ist dies nach den ersten beiden Teilungszyklen, wenn der Embryo aus vier Zellen besteht. In Embryos, die infolge einer gestörten Entwicklung keine Chitinhülle haben, arrangieren sich die Zellen so kugelförmig wie möglich. Doch normalerweise bevorzugen die Zellen, infolge der rücktreibenden Kraft der ellipsoidalen Chitinhülle, eine Anordnung in einer Ebene. Dies bildet die Grundlage für eine weiterhin korrekte Morphologie des sich entwickelnden Embryos.

Eine weitere Regelmäßigkeit in der embryonalen Entwicklung wird sichtbar, wenn man die Zeiten bis zur jeweils nächsten Zellteilung misst. Dann zeigt sich, dass die Teilungszeiten umgekehrt proportional zum Zellvolumen sind: Je kleiner die Zellen des Embryos werden, desto länger dauert ihre Teilung.³ Auf diese Weise ist auch im komplexer werdenden Embryo sichergestellt, dass die neu entstandenen Zellen genug Zeit haben, ihre jeweilige Relaxationsposition zu erreichen, und nicht an falschen Positionen landen. Auch diese Kopplung von Zellgröße und Teilungszeit lässt sich wieder mit vergleichsweise einfachen und plausiblen physikalischen Mechanismen erklären.

Ist damit jede Ungewissheit zumindest in der frühen Embryogenese von *C. elegans* verschwunden? Letzt-

■ Abb. 6: Prof. Dr. Matthias Weiss (Mitte), Sebastian Krauß M.Sc. (links) und Rebecca Benelli M.Sc. (rechts) bei der Überprüfung einer Kulturplatte, die von *C. elegans* besiedelt ist (Foto: Christian Wiffler).



■ Abb. 5: Lichtblattmikroskopische Aufnahmen von Embryos, die infolge einer gestörten Entwicklung keine Chitinhülle besitzen (Bilder: Matthias Weiss).

lich nicht ganz, denn individuelle Embryos zeigen nach wie vor signifikante Fluktuationen um das „mittlere Verhalten“, wie es sich für eine größere Zahl von ihnen im Durchschnitt vorhersagen lässt. Zudem ist ein wichtiger Zufallsfaktor, das sogenannte „biochemische Rauschen“, in den Vorhersagen aus der Mechanik noch gar nicht enthalten. Dies bedeutet, dass eine Reihe nicht vollständig determinierter Vorgänge beim Ablesen von Genen sowie bei der Produktion und beim Abbau von Proteinen noch zu den Fluktuationen beiträgt. Es bleiben also Ungewissheiten – und es wird auch künftig die Aufgabe der Wissenschaft sein, sie zu identifizieren und möglicherweise zu verringern.

LITERATURTIPPS

R. Benelli, P. Struntz, D. Hofmann, M. Weiss: Quantifying spatiotemporal gradient formation in early *Caenorhabditis elegans* embryos with lightsheet microscopy, *Journal of Physics D* (2020), 53, 295401. DOI: 10.1088/1361-6463/ab8597.

R. Fickentscher, S.W. Krauß, M. Weiss: Anti-correlation of cell volumes and cell-cycle times during the embryogenesis of a simple model organism. *New Journal of Physics* (2018), 20, 113001. DOI: 10.1088/1367-2630/aaea91.

- 1 R. Benelli et al.: *Journal of Physics D* (2020), siehe Literaturtipps.
- 2 R. Fickentscher, P. Struntz, M. Weiss: Mechanical Cues in the Early Embryogenesis of *Caenorhabditis elegans*. *Biophysical Journal* (2013), 105, 1805. DOI: 10.1016/j.bpj.2013.09.005. – R. Fickentscher, P. Struntz, M. Weiss: Setting the Clock for Fail-Safe Early Embryogenesis. *Phys. Rev. Lett.* (2016), 117, 188101. DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.188101.
- 3 R. Fickentscher et al: *New Journal of Physics* (2018), siehe Literaturtipps.



■ Stefan Knauer

Wissenschaft in der Krise?

Eine europäische Initiative
entwickelt Lösungsansätze

■ Untersuchung des Faltungszustandes eines Proteins zur Qualitätskontrolle mittels NMR-Spektroskopie (Foto: Jürgen Rennecke).

In der Medizin sowie in den Natur-, Lebens-, Ingenieur-, Sozial- und Geisteswissenschaften stellt Reproduzierbarkeit einen Grundpfeiler empirischer Forschungsarbeit dar. Zugleich ist sie eine zentrale Anforderung guter wissenschaftlicher Praxis. Je nach Disziplin hat der Begriff „Reproduzierbarkeit“ eine etwas andere Bedeutung, doch im Allgemeinen versteht man darunter, dass ein bestimmter Vorgang beliebig oft wiederholt werden kann, und zwar stets mit dem gleichen Ergebnis. In den Naturwissenschaften bedeutet dies: Die in einem Experiment erzielten Befunde können erst dann als glaubwürdig erachtet werden, wenn sie unter gleichen Bedingungen (in unabhängigen Laboratorien) reproduzierbar sind. Nur unter dieser Voraussetzung kann im Verlauf der Forschung ein Grad von Gewissheit erzielt werden, der erforder-

lich ist, um Forschungsergebnisse beispielsweise in der Medizin oder neuen technologischen Entwicklungen verantwortungsvoll anwenden zu können. Dementsprechend besteht ein öffentliches Interesse an der Sicherung wissenschaftlicher Befunde, an der Identifizierung nicht-reproduzierbarer Ergebnisse und an der Aufdeckung absichtlicher Fälschungen.

Reproduzierbarkeit ist allerdings kein generelles Kriterium wissenschaftlicher Erkenntnis oder guter Wissenschaft. So gibt es zahlreiche Forschungsgebiete, die einmalige Ereignisse wie einen Vulkanausbruch oder Sternener Explosionen untersuchen oder sich mit Phänomenen befassen, die zum Beispiel aus technischen oder finanziellen Gründen nicht wiederholt beobachtet werden können. Die Feststellung der Reproduzierbarkeit oder der Nicht-Reproduzierbarkeit eines Forschungsergebnisses stellt schon an sich ein wissenschaftliches Ergebnis dar, und eine erwiesene Nicht-Reproduzierbarkeit ist nicht per se ein Indiz für schlechte Wissenschaft. Diese Tatsache darf allerdings, wenn die Reproduzierbarkeit eines wissenschaftlichen Ergebnisses methodisch erwartet wird, nicht als Entschuldigung für Nicht-Reproduzierbarkeit verwendet werden.

Das Problem

Schon seit geraumer Zeit hat die präklinische Forschung, die ein wichtiges Scharnier zwischen der biomedizinischen und pharmakologischen Grundlagenforschung und deren klinischer Anwendung und Weiterentwicklung bildet, mit der Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen ein Problem. Vor allem eine Veröffentlichung im Jahr 2012 zur mangelnden Reproduzierbarkeit von präklinischen Studien in der Krebsforschung¹ und eine Serie von Artikeln in der Zeitschrift *Lancet*, einer der ältesten und renommiertesten medizinischen Fachzeitschriften, im Jahr 2014 haben dazu beigetragen, die Debatte neu zu entfachen. Es folgten zahlreiche weitere Artikel, und eine Umfrage der Zeitschrift *Nature* im Jahr 2016 unter rund 1500 Wissenschaftler*innen ergab, dass 70 Prozent der Befragten bei dem Versuch gescheitert waren, Experimente anderer Forschungsgruppen zu reproduzieren. Weiterhin bestätigten darin 90 Prozent der Befragten, dass sich die Wissenschaft in einer Krise befindet.² Diese „Krise der Reproduzierbarkeit“ – besser bekannt unter dem englischen Begriff „reproducibility crisis“ – umfasst verschiedenste Disziplinen der Naturwissenschaften, einschließlich der Medizin und Biomedizin.

Verfolgt man das Problem mangelnder Reproduzierbarkeit weiter, so gelangt man unweigerlich zu den Fragen „Sind denn die meisten veröffentlichten Forschungsergebnisse falsch?“ und „Verursacht das nicht immense Kosten?“ Eine Studie aus dem Jahr 2015 versucht, diese Kosten abzuschätzen, wobei die Autoren „lediglich“ eine Nicht-Reproduzierbarkeitsrate von 50 Prozent zugrunde legten. Es ergab sich, dass allein die USA pro Jahr 56,4 Milliarden US-Dollar in die präklinische Forschung investieren, wovon rund 28 Milliarden auf nicht-reproduzierbare Forschung entfallen.³ Diese Fakten sind besorgniserregend und verdeutlichen die Notwendigkeit zu handeln.

„Damit das Vertrauen in die Wissenschaft und ihre Qualität erhalten bleibt, möglicherweise auch gesteigert werden kann, sollten gegenwärtigen Anstrengungen, dem Reproduzierbarkeitsmangel entgegenzuwirken, höchste Priorität eingeräumt werden.“

Neben Forschenden haben mittlerweile auch wissenschaftliche Zeitschriften und Förderinstitutionen, wie die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) oder die National Institutes of Health in den USA, die Krise offen anerkannt und begonnen, darauf zu reagieren. Die nationale und internationale Debatte zeigt: Selbstkontrolle in der Wissenschaft wird auch in Bezug auf die Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen ernstgenommen und als drängende Herausforderung begriffen, denn die Replikationskrise gefährdet sowohl die Leistungsfähigkeit der Forschung an sich als auch das gesellschaftliche Vertrauen in sie. Die Debatte zeigt aber ebenso deutlich, dass die Grundidee wissenschaftlicher Forschung – nämlich dass sie in der Lage ist, sich selbst zu kontrollieren und sich auf der Grundlage reproduzierter Ergebnisse weiterzuentwickeln – trotz der gegenwärtigen Probleme in Kraft bleibt.

Ursachen mangelnder Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeitskrise resultiert aus einem Zusammenwirken verschiedenster Ursachen, die in den jeweiligen Disziplinen unterschiedlich stark ins Gewicht fallen. Die häufigsten und wichtigsten Ursachen sind

- **Wettbewerbs- und Publikationsdruck:** Forschende sehen sich mit einem stetig steigenden Wettbewerbs- und Publikationsdruck konfrontiert. Die sorg-



■ Abb. 1: Die Reproduzierbarkeitskrise (Grafik: Stefan Knauer).

fältige Planung, Vorbereitung, Durchführung und Auswertung von Experimenten sowie die anschließende Publikation der Ergebnisse erfordert Personal, finanzielle Mittel, Zeit und die Gelegenheit – all dies sind Parameter, die in starkem Kontrast zu dem zunehmenden Konkurrenz-, Erfolgs- und Beschleunigungsdruck stehen. Zudem sind Versuche, die in früheren Experimenten erzielte Ergebnisse im Originallabor oder andernorts zu wiederholen (sog. Replikationsstudien) oftmals teuer, binden Ressourcen und sind aus publikationstechnischer Sicht weniger attraktiv als die Veröffentlichung erstmals erzielter Ergebnisse.

■ *Unzulängliche Protokollierung, selektive Veröffentlichung und limitierter Zugang zu Literatur:* Experimente, die zu den erstmalig veröffentlichten Forschungsergebnissen geführt haben, werden in der betreffenden Publikation oft nur unzureichend beschrieben – unter anderem, weil sie mangelhaft pro-

tokolliert wurden. Außerdem werden häufig nicht alle im Rahmen einer Studie erhobenen Rohdaten tatsächlich ausgewertet und/oder veröffentlicht. Nicht selten beeinflusst hierbei ein angestrebtes Forschungsergebnis bereits die Auswahl und Publikation der Daten. Hinzu kommt in diesem Zusammenhang die Kostenpflichtigkeit des Zugangs zu vielen wissenschaftlichen Zeitschriften oder einzelnen Artikeln. So bleibt vielen Wissenschaftler*innen der Einblick in die Originalpublikationen und die darin enthaltenen experimentellen Beschreibungen aus finanziellen Gründen verwehrt.

■ *Qualitätsmängel bei den Experimenten:* Das Design oder die Durchführung der Experimente, aus denen die Forschungsergebnisse hervorgegangen sind, erweisen sich in manchen Fällen als unzulänglich. Es stellt sich heraus, dass fragwürdige, ungeeignete oder unzureichende Methoden eingesetzt wurden, was unter anderem auf mangelnde Expertise, Zeitdruck, fehlenden Zugang zu bestimmten Instrumenten oder eine ungenügende fachliche Betreuung zurückzuführen ist.

■ *Qualitätsmängel bei Geräten, biologischen Reagenzien und Referenzmaterialien:* Immer wieder ist festzustellen, dass die eingesetzten Geräte und Instrumente nicht richtig bedient oder nicht bzw. nicht korrekt kalibriert wurden – wobei für eine fehlerhafte Kalibrierung oft Referenzmaterialien minderer Qualität oder mangelndes Know-How verantwortlich sind. Ein weiterer gravierender Mangel ist häufig die mangelhafte Qualität der verwendeten biologischen Reagenzien, beispielsweise von gereinigten Proteinen.

Was kann man tun?

Europäische Initiativen suchen Antworten

Wissenschaftler*innen, Redaktionen wissenschaftlicher Zeitschriften, Forschungseinrichtungen, Wissenschaftsorganisationen und Förderinstitutionen sind sich der gesamten Problematik bewusst. Bereits seit geraumer Zeit gibt es daher auf nationaler und internationaler Ebene Bestrebungen, etwas dagegen zu unternehmen. Beispielsweise sollen „Open access“-Zeitschriften und „Open access“-Initiativen Literatur für jedermann frei zugänglich machen. Zudem haben viele Zeitschriften und öffentliche Datenbanken mittlerweile hohe Standards für bestimmte Methoden, beispielsweise für statistische Analysen, etabliert. Des Weiteren wurden Initiativen wie die „NHI Rigor and Reproducibility Initiative“

■ *Abb. 2: Untersuchung der Homogenität einer Proteinprobe zur Qualitätskontrolle mittels analytischer Größenausschlusschromatographie (Foto: Jürgen Rennecke).*



der National Institutes of Health ins Leben gerufen. Dank dieser Ansätze sind bereits deutliche Verbesserungen spürbar. Viele Initiativen, die der „reproducibility crisis“ entgegenwirken wollen, sind jedoch bislang nur begrenzt von Erfolg gekrönt, oder aber es handelt sich eher um lokale oder fachspezifische Bestrebungen, die nicht auf die gesamte Wissenschaftsgemeinschaft ausgerichtet sind.

Eine Initiative, die unter anderem Lösungsansätze für die Krise auf breiter internationaler Ebene entwickeln und etablieren will, ist das europäische Netzwerk „Association of Resources for Biophysical Research in Europe (ARBRE)“. Es wurde 2014 von Patrick England (Institut Pasteur, Frankreich) und Thomas Jowitt (University of Manchester, UK) ins Leben gerufen, um Expert*innen und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Molekularen Biophysik aus ganz Europa miteinander in Kontakt zu bringen. So wurde ein innovatives, offenes und interdisziplinäres Netzwerk geschaffen. Die Etablierung des Netzwerks stieß in der Fachwelt auf lebhaftes Interesse und wurde von 2016 bis 2020 von der „European Cooperation in Science and Technology (COST)“ gefördert. In dieser Zeit gewann das Netzwerk unter dem Akronym „ARBRE-MOBIEU“ (MOBIEU: Molecular Biophysics in Europe) internationale Bekanntheit. Es vereinigte schließlich mehr als 400 Forschende aus rund 150 Einrichtungen in 30 europäischen Ländern, die das Netzwerk nutzen, um ihr Fachwissen auf einer

gemeinsamen Plattform zusammenzuführen. Eine der sieben Arbeitsgruppen des Netzwerks widmete sich der Herausforderung, die Qualität wissenschaftlicher Daten zu optimieren. Sie wurde von Stefan H. Knauer (Universität Bayreuth) zusammen mit Margarida Bastos (Universität Porto, Portugal) geleitet und verfolgte verschiedene Ansätze, um dieses Ziel zu erreichen:

- In vielen Forschungsbereichen spielen gereinigte Proteine eine wichtige Rolle, doch es fehlen klare Standards für die Qualitätskontrolle dieser biologischen Reagenzien – oder, sofern es etablierte Standards gibt, werden sie nicht ausreichend umgesetzt. Infolgedessen werden beispielsweise in der präklinischen Forschung Peptide und Antikörper schlechter Qualität eingesetzt, die nicht nur die Qualität der Forschung insgesamt beeinträchtigen, sondern auch hohe Kosten verursachen. Einer Schätzung zufolge sind 36 Prozent der präklinischen, nicht reproduzierbaren Ergebnisse in den USA unmittelbar auf eine unzureichende Qualität von biologischen Reagenzien und Referenzmaterialien zurückzuführen, was Kosten von rund 10,8 Milliarden US-Dollar jährlich verursacht.⁴

Bereits vor mehr als zehn Jahren gab es Bestrebungen des europäischen Netzwerkes „Protein Production and Purification Partnership in Europe (P4EU)“, Standards für die Qualitätskontrolle (quality control, QC)

LINKTIPPS

Homepage des Verbandes ARBRE (befindet sich im Aufbau): <https://www.arbre-biophysics.eu/>

Homepage des europäischen Netzwerkes ARBRE-MOBIEU: <https://arbre-mobieu.eu/>

Homepage des europäischen Netzwerkes MOSBRI: <https://www.mosbri.eu/>

Qualitätskontrolle von gereinigten Proteinen

Die Richtlinien, die von Mitgliedern der europäischen Netzwerke „ARBRE-MOBIEU“ und „P4EU“ erarbeitet wurden, umfassen insbesondere die folgenden Anforderungen:

1. *Mindeststandards für Informationen über Proteine:*

Für jedes verwendete Protein sollten mindestens die folgenden Daten verfügbar sein:

- vollständige Sequenz
- exakte Produktions- und Lagerbedingungen
- die Methode zur Konzentrationsbestimmung

2. *Mindeststandards der Qualitätskontrolle:* Diese QC-Kriterien sollten mindestens erfüllt sein, bevor mit dem Protein gearbeitet wird. Sie können mit einfachen, weit verbreiteten Methoden untersucht werden:

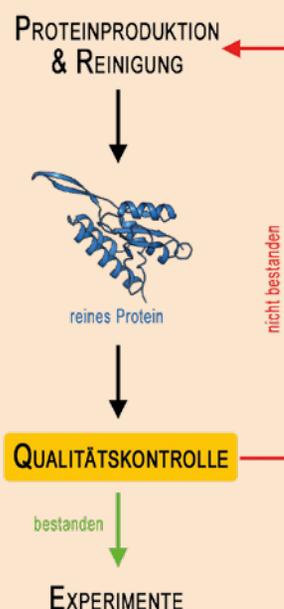
- Reinheit, z.B. überprüft mittels Natrium-Dodecylsulfat-Polyacrylamid-Gelelektrophorese

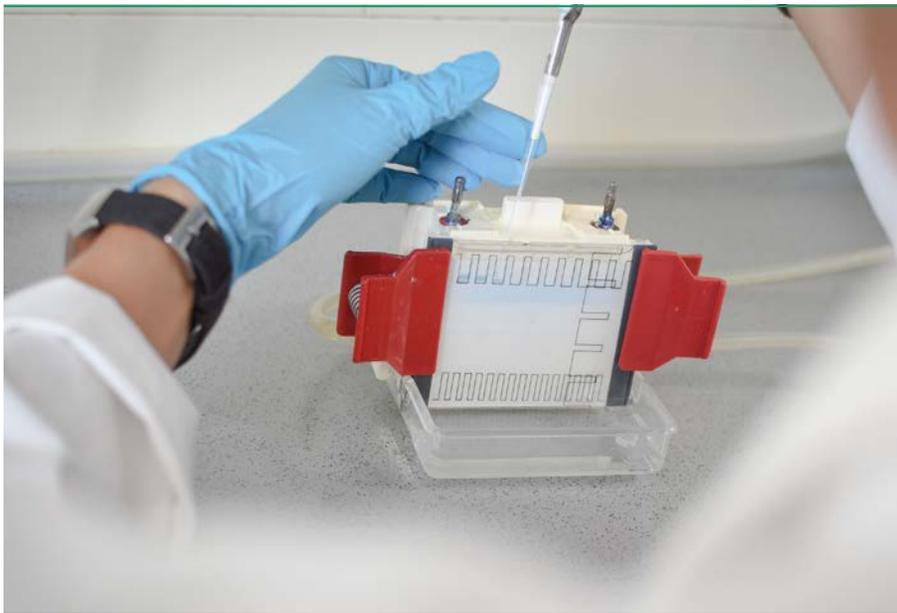
- Homogenität/Dispersität, z.B. überprüft mittels analytischer Größenausschlusschromatographie oder dynamischer Lichtstreuung
- Identität, z.B. überprüft mittels Massenspektrometrie

3. *Erweiterte Kriterien der Qualitätskontrolle:* Zusätzlich zu den mindestens zu erfüllenden QC-Kriterien kann das Zielprotein bezüglich seiner Qualität weiter charakterisiert werden, etwa im Hinblick auf seinen Faltungszustand oder seine spezifische Aktivität.

Weitere Informationen: <https://arbre-mobieu.eu/guidelines-on-protein-quality-control/>

■ Abb. 3: Schema der von ARBRE-MOBIEU und P4EU etablierten Richtlinien zur Qualitätskontrolle von gereinigten Proteinen (Grafik: Stefan Knauer, Protein Data Bank-ID: 5OND).





■ Abb. 4: Untersuchung der Reinheit einer Proteinprobe zur Qualitätskontrolle mittels Natrium-Dodecylsulfat-Polyacrylamid-Gelelektrophorese (Foto: Jürgen Rennecke).

von gereinigten Proteinen zu etablieren, jedoch ohne großen und nachhaltigen Erfolg. Zudem existieren derzeit nur wenige wissenschaftliche Zeitschriften und Datenbanken, die ihre Autor*innen verpflichten, QC-Daten für die in ihrer Forschung verwendeten Proteine zu hinterlegen. Deshalb schloss sich eine Gruppe von ARBRE-MOBIEU-Mitgliedern, darunter Stefan H. Knauer, mit Vertretern von P4EU zusammen. Dies gab der Initiative, einheitliche Standards zu etablieren und durchzusetzen, frischen Aufwind und es wurden neue Ideen und Konzepte entwickelt. Die Wissenschaftler*innen generierten zunächst allgemeine Richtlinien zur QC von gereinigten Proteinen. Diese Richtlinien beschreiben beispielsweise einfache Tests, die eine zuverlässige Qualitätsprüfung der einzusetzenden Reagenzien ermöglichen. Diese stießen in beiden Netzwerken auf große Resonanz und werden seither dort umgesetzt, verbreitet und durch eine umfangreiche Unterschriftenliste unterstützt. Die Richtlini-

en wurden kürzlich auch in *Nature Communications* veröffentlicht; zusammen mit der Empfehlung, dass alle künftigen Veröffentlichungen und Förderanträge auf dem Gebiet der Lebenswissenschaften QC-Daten für alle jeweils relevanten proteinbasierten Reagenzien enthalten sollen.⁵ Eine kürzlich im *European Biophysics Journal* veröffentlichte Studie zeigt, dass die Einhaltung dieser QC-Richtlinien die Reproduzierbarkeit von Experimenten verbessert und das Vertrauen in deren Ergebnisse stärkt.⁶

■ Ein weiterer Ansatz der Arbeitsgruppe ist die Standardisierung. Grundlegende Voraussetzung für hohe Datenqualität, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit ist, dass Experimente, bei denen eine bestimmte Technik zum Einsatz kommt, nach einem standardisierten Vorgehen durchgeführt werden. Die Standardisierung soll systematische Fehler vermeiden, die das Messergebnis verfälschen, und sie soll gewährleisten, dass die Experimente in verschiedenen Forschungsgruppen auf die gleiche Art durchgeführt werden. Derzeit gibt es für viele Techniken im Bereich der Biophysik noch sehr unterschiedliche Versuchsprotokolle, die wiederum von zahlreichen Labors individualisiert und angepasst werden. Die Arbeitsgruppe hat für etliche Techniken „Standard Operation Procedures“ (SOPs) erarbeitet, die innerhalb der gesamten ARBRE-MOBIEU-Gemeinschaft geprüft und anerkannt wurden. Seither werden sie von den Mitgliedseinrichtungen erfolgreich genutzt und in die „Scientific community“ getragen, damit sie sich hier als genereller Standard etablieren. Mittlerweile existieren SOPs für rund 15 Techniken, die frei zugänglich und teilweise auch in Zeitschriften veröffentlicht sind.⁷

■ Um eine hohe Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu erreichen, müssen Standard-/Modellsysteme für Forschungstechniken und Reagenzien zur Kalibrierung von Geräten hohe Anforderungen erfüllen. Eine Umfrage innerhalb von ARBRE-MOBIEU ergab, dass es vor allem für Techniken zur Untersuchung molekularer Wechselwirkungen einen starken Bedarf an neuen, möglichst vielseitig anwendbaren Standardsystemen gibt. Ein erstes neues System für Interaktionsstudien wurde bereits entwickelt und hat sich als sehr vielversprechend erwiesen.⁸

■ Um Aussagen über die Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit und Verlässlichkeit von Forschungsergebnissen treffen zu können, bieten sich Benchmarking-Studien an. Hierbei handelt es sich um breit angelegte Vergleichsstudien, die mit standardisierten Test-/Modellsystemen durchgeführt werden. Die

LITERATURTIPPS

A. de Marco et al.: Quality control of protein reagents for the improvement of research data reproducibility. *Nature Communications* (2021), 12, 2795. DOI: 10.1038/s41467-021-23167-z.

B. Raynal et al.: Assessing and Improving Protein Sample Quality, in: T. Daviter et al. (eds.): *Protein-Ligand Interactions: Methods and Applications*. New York: 2021, 3-46. DOI: 10.1007/978-1-0716-1197-5_1.

- 1 C.G. Begley, L.M. Ellis: Drug development: Raise standards for preclinical cancer research. *Nature* (2012), 483, 531-533. DOI: 10.1038/483531a.
- 2 M. Baker: 1,500 scientists lift the lid on reproducibility. *Nature* (2016), 533, 452-454. DOI: 10.1038/533452a.
- 3 L.P. Freedman: The Economics of Reproducibility in Preclinical Research. *Plos Biology* (2015). DOI: 10.1371/journal.pbio.1002165.
- 4 Ebd.
- 5 A. de Marco et al.: *Nature Communications* (2021), siehe Literaturtipps.
- 6 N. Berrow et al.: Quality control of purified proteins to improve data quality and reproducibility: results from a large-scale survey. *European Biophysics Journal* (2021), 50, 453-460. DOI: 10.1007/s00249-021-01528-2.
- 7 <https://arbre-mobieueu/sops-wg4/>
- 8 H.L. Birchenough, H.D.R. Nivia, T.A. Jowitt: Interaction standards for biophysics: anti-lysozyme nanobodies. *European Biophysics Journal* (2021), 50, 333-343. DOI 10.1007/s00249-021-01524-6.
- 9 B. López-Méndez et al.: Reproducibility and accuracy of microscale thermophoresis in the NanoTemper Monolith: a multi laboratory benchmark study. *European Biophysics Journal* (2021), 50, 411-427. DOI: 10.1007/s00249-021-01532-6.

Molecular-Scale Biophysics – Biophysik auf molekularer Ebene

In diesem dynamischen und interdisziplinären Forschungsfeld werden biologische (Makro-)moleküle und ihre Komplexe untersucht. Die Charakterisierung der Systeme erfolgt auf einer Skala zwischen Strukturbeschreibungen auf atomarer Ebene und Beobachtungen auf Zellebene („between atom and cell“). „Molecular-scale Biophysics“ findet signifikante Anwendungen in der Grundlagenforschung, der Biomedizin und der Wirkstoffentwicklung. Dabei werden Verfahren aus den Bereichen Spektroskopie, Hydrodynamik, Echtzeit-Mikrofluidik und Thermodynamik sowie Einzelmolekül-Techniken eingesetzt und auch miteinander kombiniert.

Arbeitsgruppe im ARBRE-MOBIEU-Netzwerk hat bislang drei solcher Studien durchgeführt. Eine dieser Studien beschäftigte sich beispielsweise mit einer relativ neuen Technik, der *Microscale Thermophoresis* (MST), die der Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Biomolekülen dient.⁹ Dabei wurden zwei Testsysteme in mehr als 40 Labors in Europa und den USA geprüft.

Auch andere Arbeitsgruppen von ARBRE-MOBIEU entwickelten Initiativen zur Steigerung der Datenqualität. Im Rahmen jährlicher internationaler Schulungen vermittelten ausgewiesene Expert*innen den Teilnehmer*innen, die in unterschiedlichen Disziplinen zuhause waren, neue Forschungsmethoden und -ansätze aus der Biophysik. Darüber hinaus erhielten zahlreiche Wissenschaftler*innen die Möglichkeit, Forschungsinstitute in anderen europäischen Ländern zu besuchen und von deren Expertise und Ausstattung zu profitieren. ARBRE-MOBIEU hat zudem sehr erfolgreich mit Entwicklern biophysikalischer Instrumente zusammengearbeitet. Gemeinsames Ziel war es hierbei, Geräte und Methoden an die Bedürfnisse der „Scientific community“ anzupassen und zu optimieren.

Neue Initiativen

Aus ARBRE-MOBIEU sind nun zwei neue Initiativen hervorgegangen, welche die Grundideen von ARBRE-MOBIEU weiterentwickeln und ausbauen.

Zum einen wurde am 1. Juli 2021 der eigenständige Verband „ARBRE“ gegründet, mit Adriana E. Miele (Universität Lyon, Frankreich) als Präsidentin und Stefan H. Knauer (Universität Bayreuth) als Vizepräsident. Zum anderen startete zeitgleich das Konsortium „Molecular-Scale Biophysics Research Infrastructure (MOSBRI)“, das als EU-Infrastruktur-Projekt aus dem EU-Rahmenprogramm „Horizon 2020“ gefördert wird.

Ausblick

Reproduzierbarkeit und Verlässlichkeit von Forschungsdaten sind wesentliche Grundlagen wissenschaftlicher Forschung. Damit das Vertrauen in die Wissenschaft und ihre Qualität erhalten bleibt, möglicherweise auch gesteigert werden kann, sollte den gegenwärtigen Anstrengungen, dem Reproduzierbarkeitsmangel entgegenzuwirken, höchste Priorität eingeräumt werden. Basierend auf den vielversprechenden Ansätzen von ARBRE-MOBIEU, bauen ARBRE und MOSBRI dieses Engagement stetig aus: mit dem gemeinsamen Ziel, in Europa und darüber hinaus die Datenqualität in der naturwissenschaftlichen Forschung zu optimieren und insbesondere die Biophysik als zukunftsweisende Disziplin voranzubringen.

AUTOR



Dr. Stefan H. Knauer ist Habilitand am Lehrstuhl Biochemie IV - Biophysikalische Chemie und RNA an der Universität Bayreuth.

■ Abb. 5 : Untersuchung des Faltungszustandes eines Proteins zur Qualitätskontrolle mittels Circular dichroismus-Spektroskopie (Foto: Jürgen Rennecke).





■ Anna Schenk
Viktoria Grün

Forschen nach dem Rezeptbuch der Natur

Von biogenen Mineralien zu neuen Energiematerialien

■ Gekammerter Nautilus (Foto: ist).

Biogene Mineralien sind Materialien mit ausgeklügelten selbstorganisierten Strukturen, die perfekt an ihre jeweilige Funktion angepasst sind – beispielsweise hinsichtlich ihrer mechanischen Stabilität oder ihrer strukturbedingten Farbeffekte. Diese komplexen Architekturen lassen sich als Antworten auf materialwissenschaftliche Problemstellungen interpretieren, welche die Natur im Laufe der Evolution nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ gefunden hat. Dieses Prinzip spielt in der Materialwissenschaft eine zentrale Rolle, zum Beispiel dann, wenn es um das Design und die Synthese von Materialien geht, die spezielle Eigenschaften aufweisen müssen, damit sie unter definierten Bedingungen für gewünschte technische Anwendungen tauglich sind. Angesichts einer solchen Herausforderung ist vieles ungewiss, auch wenn die Forschungsarbeiten zur Entwicklung der angestrebten Materialien in der Regel von einem breiten Fundament gesicherter Erkenntnisse ausgehen können.

Der folgende Beitrag will an einigen Beispielen zeigen, dass ein Blick auf biologische Mineralsysteme den Prozess der Erforschung und Entwicklung neuer Funktionsmaterialien wesentlich fördern kann. Denn die Evolution hat nach dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ der Wissenschaft gleichsam vorgearbeitet: Sie hat lebende Organismen mit Materialien ausgestattet, die für deren Leben und Überleben in ihrer jeweiligen Umwelt geradezu maßgeschneidert sind. Um zu verstehen, wie die Natur diese Antworten gefunden hat, ist es wichtig, sich die spezifischen Anforderungen vor Augen zu führen, die von den jeweiligen Materialien erfüllt werden. „If bone is the answer, then what is the question?“ lautete der Titel eines im Jahr 2000 erschienenen Artikels des Bioingenieurs Rik Huiskes, in dem es um die Struktur und Biomechanik von Wirbeltierknochen ging.¹ Nur wenn das Problem identifiziert ist, für das die Evolution eine Lösung entwickelt hat, kann die Materialwissenschaft vom Rezeptbuch der Natur lernen.

Biomminerale: Einfache Ausgangsstoffe, komplexe Architektur

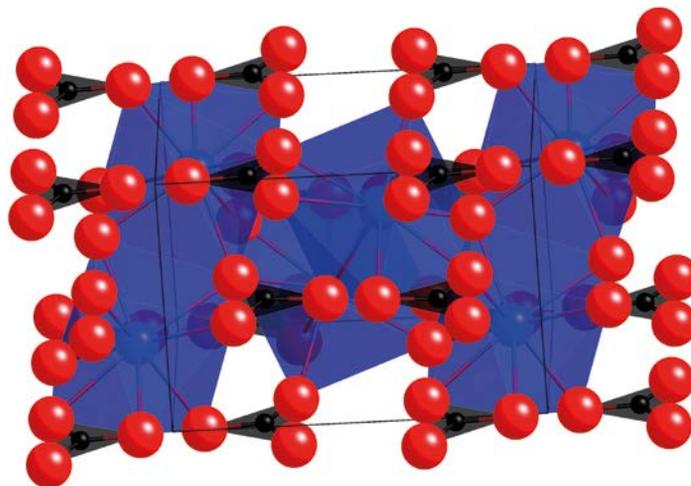
Biogene Mineralien – im folgenden kurz Biomminerale genannt – bestehen in der Regel aus einfachen und gut verfügbaren Ausgangsstoffen, beispielsweise aus den Elementen Calcium, Magnesium, Kohlenstoff, Sauerstoff, Phosphor und Schwefel. Dies bedeutet zwar eine Einschränkung hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung, aber die Natur ist in der Lage, die Funktionseigenschaften der aus

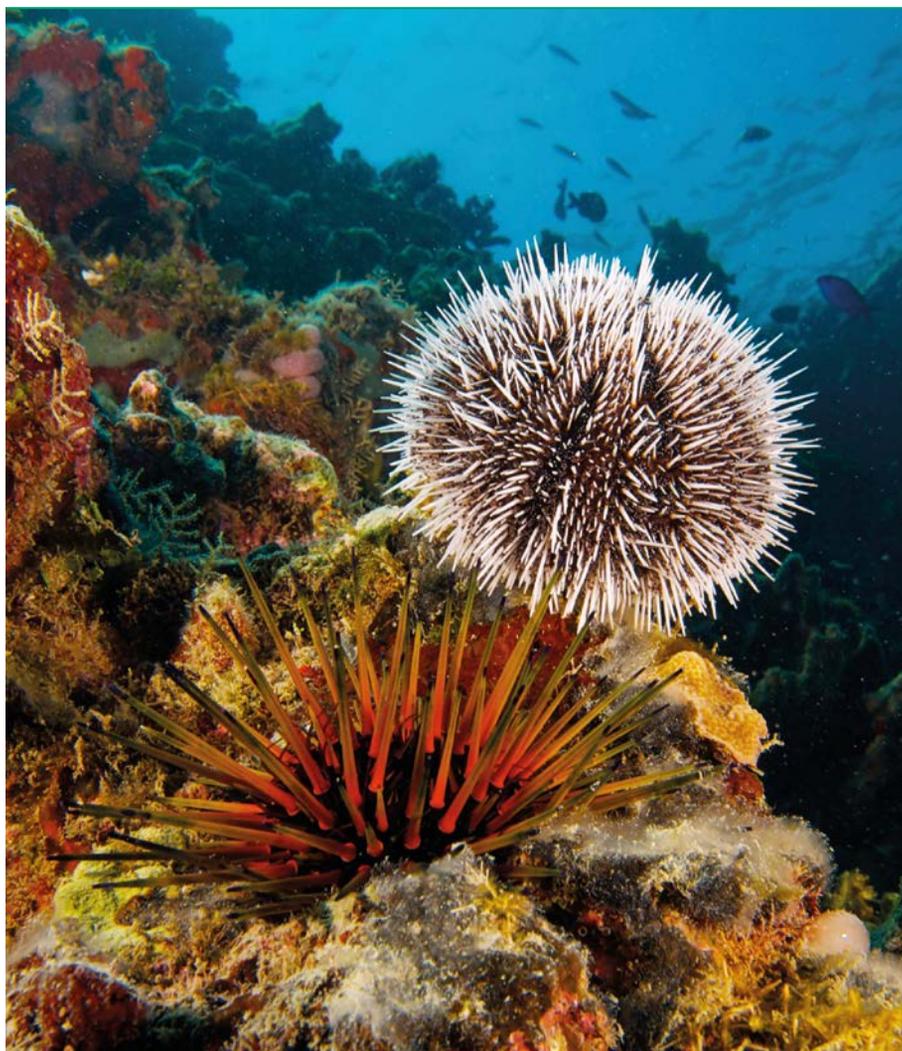


■ Abb. 1: Geologische, biogene und synthetische Calciumcarbonat-Strukturen. **Oben links:** Nautiluschale mit glänzender Perlmuttschicht, die aus Aragonit besteht; anbei ein geologischer Aragonitkristall. Aragonit ist eine der drei in der Natur vorkommenden wasserfreien kristallinen Modifikationen von Calciumcarbonat. – **Oben rechts:** Seeigelskelett, das aus einer porösen Calcitstruktur besteht; anbei ein geologischer Calcitkristall. – **Mitte:** Synthetisch hergestellter Calciteinkristall. – **Unten:** Bioinspirierte Calcitpartikel mit ungewöhnlichen Morphologien, die durch Kristallisation in Gegenwart von Polyvinylamin (links)² und von Polysyrolsulfonat (rechts)³ entstehen (Bilder: Anna Schenk).

diesen Elementen gebildeten Materialien weiterzuentwickeln und zu optimieren (Abb. 1). Geologische Mineralkristalle, wie zum Beispiel das Calciumcarbonat (CaCO_3), das unter anderem in den Modifikationen Calcit und Aragonit vorliegen kann (Abb. 2), weisen typischerweise eine reguläre geometrische Gestalt mit glatten Begrenzungsflächen auf. Dies ist durch die periodische Anordnung der atomaren und molekularen Bausteine wie auf einem dreidimensionalen Gitter begründet. Viele Biomminerale hingegen besitzen gewölbte Flächen und eine komplexe hierarchische Organisation. Von der Nanometer-Ebene bis zur makroskopischen Gestalt ist ihre Struktur so optimiert, dass sie wesentlich zu den Funktionseigenschaften des Materials beiträgt, zum Beispiel zu einer höheren mechanischen Belastbarkeit.

■ Abb. 2: Struktur eines Aragonit-Kristalls, bestehend aus Calcium (blau), Sauerstoff (rot) und Kohlenstoff (schwarz) (Bild: Judge Nutmeg / wikimedia commons).





■ Abb. 3: Reguläre Seeigel *Tripneustes ventricosus* (oben) und *Echinometra viridis* (unten) in einem Riff. Das Skelett der Seeigel besteht aus Calcit (Foto: Nick Hobgood / wikimedia commons).

Im Unterschied zur Entstehung geologischer Mineralien wird die Biomineralisation durch organische Moleküle gesteuert. Diese können unlöslich in Wasser sein und deshalb wie eine Schablone (Templat) für die Mineralablagerung wirken. Sie können aber auch löslich sein und schon in frühen Stadien der Biomineralisation mit Ionen oder ersten Aggregaten wechselwirken. In diesem Fall kann es vorkommen, dass sie fundamental in den Prozess der Biomineralisation eingreifen – etwa in der Weise, dass sie eine geordnete Selbst-Assemblierung der entstandenen Mineraleinheiten bewirken. Wenn kleinste Reste der organischen Moleküle in der finalen kristallinen Struktur eingeschlossen bleiben, bilden sich häufig organisch-anorganische Hybride. Es gibt Biominerale, bei denen Einschlüsse solcher „Verunreinigungen“ eine wichtige Funktion erfüllen, zum Beispiel deshalb, weil sie das Material härter und widerstandsfähiger machen.

Auf der Nanoskala sind Biominerale, wie der schillernde Perlmutter des Nautilus, häufig aus perfekt angeordneten gleichförmigen Mineralbausteinen aufgebaut, die durch organische Moleküle „verklebt“ sind. Dieser ziegelartige Aufbau macht es auf der makroskopischen Skala möglich, Wölbungen, gekrümmte Flächen und komplexe Formen zu realisieren. Bei der Abscheidung der kleinsten, nur wenige Nanometer großen Mineraleinheiten sorgt der Organismus für Rahmenbedingungen, unter denen sich exakt die gewünschte Kristallphase ausbilden kann.

Zur Erzeugung komplexer Formen scheiden viele Organismen zunächst amorphe Vorstufen ab, die sich erst nachträglich in die stabilere kristalline Phase umwandeln. Solche „unstrukturierten“ Vorläuferverbindungen weisen lediglich eine Nahordnung der Ionen auf. Sie können sich daher der vorgegebenen Form einer Schablone besser anpassen als ein Kristall mit glatten Begrenzungsflächen. In der Biologie findet Mineralisation typischerweise in relativ kleinen Bereichen (*Compartments*) statt. Daher prägt sich die Kristallstruktur des Minerals anders aus, als dies in einem größeren Volumen der Fall wäre. Eine derartige Beschränkung des Mineralisationsraums kann zur Ablagerung metastabiler Mineralphasen führen, die unter Normalbedingungen kurzlebig sind und sich kaum isolieren lassen.

Bioinspirierte Kristallisation

Mit ihren ausgeklügelten und im Laufe der Evolution optimierten Konzepten für Bildung, Wachstum und Selbstorganisation kristalliner Partikel ist die Natur imstande, entsprechend den jeweiligen Umgebungsbedingungen hochfunktionale Materialien zu erzeugen (Abb. 3). Die charakteristischen Eigenschaften der Biominerale sind daher eine reichhaltige Quelle der Inspiration für viele materialwissenschaftliche Forschungsarbeiten, bei denen Kristallisationsphänomene eine Rolle spielen – so etwa für die Herstellung von Zahnkeramiken und Baustoffen, aber auch von Funktionsmaterialien für die Energiewende.

Um die Bauprinzipien der Biomineralisation technologisch nutzbar machen zu können, bedarf es zuvor eines fundierten Verständnisses der Gesetzmäßigkeiten, die der Strukturbildung zugrunde liegen. Hierfür ist es erforderlich, biologische Systeme detailliert zu betrachten und grundlegende Kristallisationsmechanismen an Modellsystemen zu studieren. So hat beispielsweise ein Einkristall des Calcits,

AUTORINNEN

Prof. Dr. Anna Schenk ist Juniorprofessorin an der Universität Bayreuth für Kolloidale Systeme. 2021 wurde sie mit einem Heinz Maier-Leibnitz-Preis ausgezeichnet.



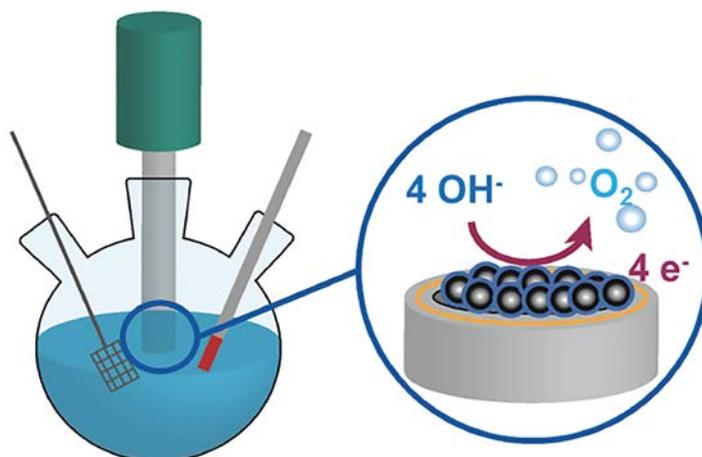
Viktoria Grün M.Sc. ist Doktorandin in der Arbeitsgruppe "Kolloidale Systeme" von Prof. Dr. Anna Schenk und hat seit Oktober 2021 eine Stelle bei der Fa. Precitec GmbH & Co. KG inne.



eines biologisch und geologisch sehr weit verbreiteten Minerals, typischerweise die Gestalt eines Rhomboeders. Doch im Labor kann die Herausbildung von Strukturen angestoßen werden, die stark von dieser regulären Form abweichen. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass wasserlösliche Polymermoleküle der Kristallisationslösung beigemischt werden. Weitere Beispiele für polymergesteuerte ungewöhnliche Strukturbildungen im Labor sind distelartige Partikel mit faserigen Auswüchsen (Abb. 1, unten links)² oder auch abgerundete Kristalle mit plättchenartiger Unterstruktur (Abb. 1, unten rechts).³ In beiden Fällen handelt es sich um nicht-klassische Kristallisationsphänomene, bei denen sich der finale Kristall durch eine Zusammenlagerung amorph oder kristalliner Partikel herausbildet.

Neue Überstrukturen für die Elektrokatalyse der Wasserspaltung

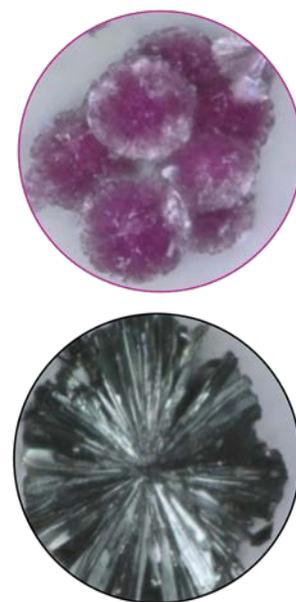
Seit einigen Jahren untersucht die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Anna Schenk intensiv die Strukturierung von Cobalt(II,III)-oxid (Co_3O_4). Synthetisch lässt sich dieses Material unter anderem durch eine thermische Umwandlung von Cobalhydroxidcarbonaten gewinnen. Hierbei handelt es sich um Vorläuferverbindungen, die aus wässriger Lösung erzeugt werden können. Co_3O_4 ist ein anorganisches Funktionsmaterial (Abb. 4) mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise in der Batterietechnik oder der Sensorik. Zudem kann es für die heterogene Katalyse eingesetzt werden. Besonders spannend ist der Einsatz von Co_3O_4 in der Elektrokatalyse, wenn es gilt, Wasser in seine elementaren Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten (Abb. 5). Hier ergeben sich neue Perspektiven mit Blick auf robus-



te, effiziente und nachhaltige Systeme für die Wandlung und Speicherung von Energie – und damit auch für ein Gelingen der Energiewende.

■ Abb. 5: Schematische Illustration einer elektrochemischen Zelle. Co_3O_4 -Katalysatorpartikel, die auf der Arbeitselektrode fixiert sind, katalysieren die anodische Sauerstoffentwicklung, eine Teilreaktion der Wasserspaltung (Grafik: Anna Schenk).

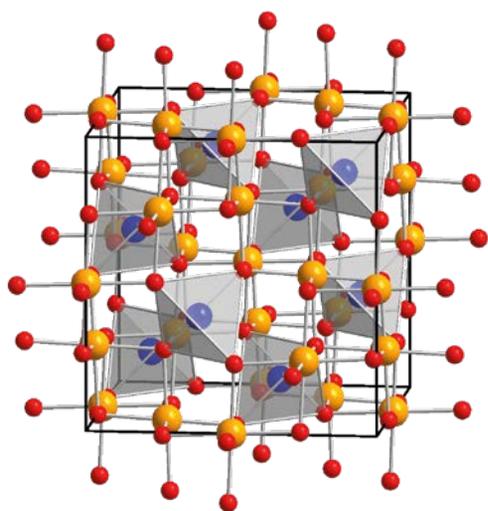
Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in Bayreuth liegt auf den Struktur-Eigenschaftsbeziehungen in Elektrokatalysatoren. Ein Beispiel sind mesoskalige Strukturmodule, welche die elektrokatalytische Aktivität von Co_3O_4 beeinflussen. Um diesen Zusammenhang nachzuweisen, wurde eine Raumtemperaturmethode zur Erzeugung von Cobalhydroxidcarbonat-Partikeln entwickelt, die sich aus strahlenförmig angeordneten Plättchen zusammensetzen und wegen ihrer halbkugelförmigen Struktur als sphärolithisch bezeichnet werden (Abb. 6).⁴ Durch Calcinierung werden die Partikel in die Co_3O_4 -Phase überführt. Über mehrere Längenskalen hinweg, bis hinunter zur Mikrometer-Ebene, bleibt ihre Morphologie erhalten. Auf der Nanoskala hingegen verwandelt sich das Co_3O_4 in eine Überstruktur aus miteinander verbundenen Nanopartikeln, die von einem Netzwerk aus Poren durchzogen ist.



■ Abb. 6: Sphärolithische Cobalhydroxidcarbonat-Partikel, vor (oben) und nach (unten) der Umwandlung in die funktionale Co_3O_4 -Phase⁴ (Bilder: Anna Schenk).

Elektrokatalysatoren nach dem Vorbild der Natur

Die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Anna Schenk an der Universität Bayreuth hat es sich zum Ziel gesetzt, grundlegende Konzepte der Biomineralisation auf die Herstellung technologisch attraktiver Materialien zu übertragen. Auf dem Gebiet der Elektrokatalyse geht es vornehmlich um die Synthese von Cobalt(II,III)-oxid (Co_3O_4). In Partikeln der Vorläuferverbindung, dem Cobalhydroxidcarbonat, sollen bei Raumtemperatur komplexe hierarchische Strukturen erzeugt werden, die sich in das katalytisch aktive Co_3O_4 umwandeln lassen. Bisherige Forschungsarbeiten haben zu vielversprechenden Erkenntnissen geführt, wie die folgenden Beispiele zeigen:



■ Abb. 4 (links): Struktur eines Cobalt(II,III)-oxid-Kristalls, bestehend aus Cobalt(II)-ionen (blau), Cobalt(III)-ionen (orange) und Sauerstoff (rot) (Bild: Andif1 / wikimedia commons).



■ Abb. 7: Links: Bioinspirierte Cobalhydroxidcarbonat-Strukturen. Eine Abscheidung in Gegenwart von Tabakmosaikviren führt zu Mikroröhrchen, die aus einem bioorganischen Kompositmaterial bestehen. Im gelben Kreis: Vergrößerte Darstellung des Querschnitts eines Mikroröhrchens und Vergleich mit den Dimensionen eines einzelnen Virus-Partikels⁶. Mitte: Selbstaufrollung als biologisches Phänomen: spiralisierte Struktur einer Schote. Rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines selbstaufgerollten Co_3O_4 -Films⁶ (Bilder: Anna Schenk & Viktoria Grün).

„Die charakteristischen Eigenschaften der Biominerale sind eine reichhaltige Quelle der Inspiration für viele materialwissenschaftliche Forschungsarbeiten“



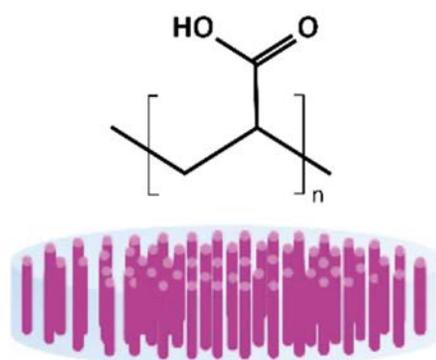
■ Abb. 8: Schalen von Seemuscheln (Foto: ist).

■ **Wasserunlösliche Biotemplate:** In Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe an der Universität Stuttgart wurden Tabakmosaikviren (TMV) verwendet, um die bioinspirierte Abscheidung von Co_3O_4 zu steuern. Die stäbchenförmigen Viren durchlaufen in einer Kristallisationslösung, in Gegenwart von Co^{2+} -Kationen, eine geordnete Assemblierung. Bei der Mineralisation dieser Überstrukturen entstehen komplexe röhrenförmige bioorganische Komposite der TMV und des Minerals.⁵ Durch Calcinierung können diese Mikroröhrchen in Co_3O_4 umgewandelt werden. Dabei zeigt sich erneut, dass die Ausprägung von Funktionseigenschaften nicht allein von der chemischen Zusammensetzung und der Oberfläche des Katalysatormaterials, sondern auch von dessen Mesostruktur bestimmt wird (Abb. 7 links).

■ **Wasserlösliche Additive:** Im Hinblick auf die Entwicklung freistehender, kompakter Elektroden mit mesoskaligen Kanälen ist es gelungen, Co_3O_4 -Filme in einem Gasdiffusionsprozess an der Wasser/Luft-Grenzfläche der Reaktionslösung abzuscheiden.⁶ Weitere Schritte führten anschließend zur Aufrollung beeindruckender spiralisierte Strukturen. Derartige Selbstfaltungsphänomene sind im Pflanzenreich verbreitet und gut erforscht. Wie weit sie auch in Mineralsystemen vorkommen, ist hingegen weitgehend unbekannt (Abb. 7 Mitte und rechts).

■ **Strukturen im Submikrometer-Bereich:** Zylindrisch geformte Poren von Polycarbonat-Membranen lassen sich in Gegenwart von Polyacrylsäure (PAA) mit Cobalhydroxidcarbonat infiltrieren. Der Prozess der Mineralabscheidung in den Kanälen, die einen Durchmesser von weniger als einem Mikrometer ha-

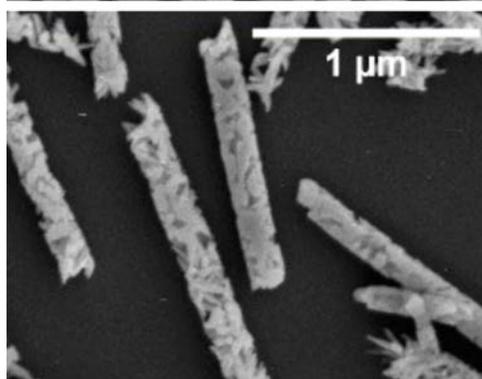
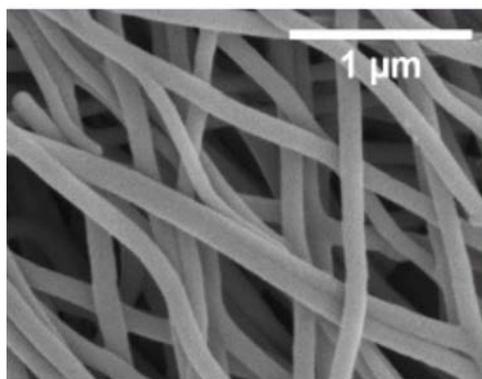
ben, hängt dabei maßgeblich von der Konzentration und dem Molekulargewicht des verwendeten Additivs ab. Hat die PAA ein niedriges Molekulargewicht, kommt es zu einer vollständigen Auskleidung der Porenräume. Dann können nach Auflösung des Templats glatte Mineralfasern mit hohem Aspektverhältnis isoliert werden. Handelt es sich jedoch um eine länger-kettige PAA, entstehen kurze Stäbchen mit einer ausgeprägten nanogranularen Feinstruktur (Abb. 9).



■ Abb. 9: Stäbchen und Fasern im Submikrometerbereich. Oben: Infiltration der zylindrischen Poren von Polycarbonatmembranen (blau) mit einer durch Polyacrylsäure stabilisierten amorphen Cobalhydroxidcarbonat-Phase (pink). Nach Auflösung der Membran werden je nach Molekulargewicht und Konzentration der PAA-Moleküle Fasern mit hohem Aspektverhältnis (Mitte) oder Stäbchen mit nanopartikulärer Unterstruktur (unten) gebildet (Bilder: Viktoria Grün).

Fazit

Der Variantenreichtum und die Präzision, mit denen die Natur Mineralisationsprozesse steuert, sind im Labor noch immer unerreicht. Doch liefert das Studium biologischer Mineralisation viele Ansatzpunkte für die Entwicklung bioinspirierter Synthesewege, die zu neuen hierarchisch strukturierten Materialien führen und möglicherweise umweltfreundlicher sind als bisherige Herstellungsverfahren. An der Universität Bayreuth werden diese Ansatzpunkte genutzt, um im Labor die komplexen Architekturen von Biomineralen mit Funktionseigenschaften technologisch genutzter Systeme zu kombinieren. Das „Rezeptbuch der Natur“ dient dabei als ein Leitfaden: Es kann die Ungewissheit hinsichtlich optimaler Synthesewege verringern und insofern dazu beitragen, die materialwissenschaftliche Forschung vor Irr- und Umwegen zu bewahren.



■ Abb. 10: Prof. Dr. Anna Schenk an der Röntgenkleinwinkelstreuungsanlage des Keylabs „Mesoscale Characterization: Scattering Techniques“ im Bayerischen Polymerinstitut (BPI) (Foto: Christian Wißler).



- 1 R. Huiskes: If bone is the answer, then what is the question? *Journal of Anatomy* (2000), 197(Pt 2), 145-156. DOI: 10.1046/j.1469-7580.2000.19720145.x.
- 2 A. S. Schenk et al.: Systematic Study of the Effects of Polyamines on Calcium Carbonate Precipitation. *Chemistry of Materials* (2014), 26 (8), 2703-2711. DOI: 10.1021/cm500523w. – Hierin die in Abb. 1 verwendeten Bilder von Calcit/Polyvinylamin-Partikeln.
- 3 A. S. Schenk et al.: Hierarchical Calcite Crystals with Occlusions of a Simple Polyelectrolyte Mimic Complex Biomineral Structures. *Advanced Functional Materials* (2012), 22 (22), 4668-4676. DOI: 10.1002/adfm.201201158. Hierin die in Abb. 1 verwendeten Bilder von Calcit/Polystyrolsulfonat-Partikeln.
- 4 A. S. Schenk et al.: Hierarchically Structured Spherulitic Cobalt Hydroxide Carbonate as a Precursor to Ordered Nanostructures of Electrocatalytically Active Co_3O_4 . *Crystal Growth & Design* (2020), 20 (10), 6407-6420. DOI: 10.1021/acs.cgd.0c00576. Hierin die in Abb. 6 enthaltenen Bilder von Cobalhydroxidcarbonat- und Cobalt(II,III)-oxid-Partikeln.
- 5 A. S. Schenk et al.: Virus-directed formation of electrocatalytically active nanoparticle-based Co_3O_4 tubes. *Nanoscale* (2017), 9 (19), 6334-6345. DOI: 10.1039/C7NR00508C. Hierin das in Abb. 7 enthaltene Bild eines Mikroröhrchens.
- 6 V. Gruen et al.: Interface-mediated formation of basic cobalt carbonate/polyethyleneimine composite microscrolls by strain-induced self-rolling. *Chemical Communications* (2021), 57, 7244-7247. DOI: 10.1039/D1CC01136G. Hierin die in Abb. 7 enthaltene REM-Aufnahme.

NATUR & TECHNIK

■ Christian Wißler

INTERVIEW MIT
FABIAN ELLER UND
JONAS LANDGRAF

Vom wissen- schaftlichen Umgang mit Ungewissheit

Ein Rückblick auf
die 70. Lindauer
Nobelpreisträgertagung

■ Hafeneinfahrt von Lindau am Bodensee (Foto: ist).

Vom 27. Juni bis 2. Juli 2021 haben Sie als Nachwuchswissenschaftler aus der Physik an der 70. Lindauer Nobelpreisträgertagung teilgenommen, die pandemiebedingt nur im Online-Format stattfinden konnte. Was ist Ihnen besonders in Erinnerung geblieben?

Fabian Eller: Es war sehr beeindruckend, wie lebhaft und engagiert die Nobelpreisträger*innen an dieser Tagung teilgenommen haben und wie sehr sie daran interessiert waren, mit uns jungen Wissenschaftler*innen über neue Ideen in der Forschung zu sprechen. Es gab viele kleine Diskussionsrunden und Gespräche unter vier Augen, in denen wir sehr konkret über unsere Arbeiten sprechen konnten. Da war eine starke persönliche Anteilnahme zu spüren.

Jonas Landgraf: Spaziergänge am Bodensee, gemeinsame Bootsfahrten oder Zeppelinflüge, die sonst zu jeder Lindauer Nobelpreisträgertagung dazugehören, mussten diesmal leider entfallen. Aber weil die Tagung online stattfand, haben sich zahlreiche ältere Nobelpreisträger eingeloggt, die sich im Fall einer Präsenzveranstaltung eine Flugreise nach Europa nicht mehr zugemutet hätten. Sogar der vor wenigen Wochen im Alter von 101 Jahren verstorbene Biochemiker Edmond Fischer war dabei. Dadurch waren Forschungserfahrungen aus vielen Jahrzehnten während der Tagung präsent.

In welchen Zusammenhängen spielte das Thema „Ungewissheit“ während der Tagung eine Rolle?

J.L.: Da muss man verschiedene Aspekte unterscheiden. Zunächst einmal wurden im persönlichen Austausch auch Unsicherheiten in Bezug auf die eigene wissenschaftliche Laufbahn, die eigene Karriereplanung thematisiert. Da haben die Nobelpreisträger*innen über ihre eigenen Lebenswege berichtet und uns auch den einen oder anderen hilfreichen Ratschlag geben können. Ganz unabhängig davon wurde im Hinblick auf aktuelle Entwicklungen die Frage diskutiert: „Why trust science?“, wieso soll man der Wissenschaft vertrauen? Heute ist bei vielen Menschen ein grundsätzliches Misstrauen zu beobachten – nicht nur in Europa, sondern auch in den USA, wo die Wissenschaft noch in den 1960er und 1970er Jahren geradezu als Fundament der amerikanischen Nation empfunden wurde. Für diesen Umschwung gibt es sicher viele Ursachen. Ein Grund könnte darin liegen, dass an die Wissenschaft zu oft hohe Erwartungen gestellt werden, die sie enttäuschen muss. Dies ist auch in der Pandemie

deutlich geworden. Viele glauben offenbar, die Wissenschaft könne mit Gewissheit konkrete Aussagen machen, die das Leben der Menschen im allgemeinen betreffen. Doch tatsächlich kann sie, auf der Basis unterschiedlicher Beobachtungen, Theorien und deren Interpretationen, lediglich Einschätzungen liefern, die später durch neue Erkenntnisse möglicherweise eingeschränkt oder widerlegt werden.

Fabian Eller M.Sc.

ist Doktorand an der Universität Bayreuth in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Eva M. Herzig für Dynamik und Strukturbildung. Hier befasst er sich derzeit mit organischen Halbleitern. Schwerpunkte sind die Untersuchung von Nanostrukturen mittels Röntgenstreuung und die Entwicklung einer neuartigen Methodik zur Beeinflussung von Nanostrukturen. Parallel zu seiner Doktorarbeit absolviert Fabian Eller das Elitestudienprogramm „Macromolecular Science“ im Elitenetzwerk Bayern an der Universität Bayreuth.



Jonas Landgraf M.Sc.

erforscht als Doktorand in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Florian Marquardt am Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen, wie sich Konzepte auf dem Gebiet des Maschinellen Lernens auf die Physik übertragen lassen. Es geht dabei um die Frage, wie mit künstlicher Intelligenz neue Erkenntnisse gewonnen werden können. Zeitgleich nimmt Jonas Landgraf am Elitestudienprogramm „Biological Physics“ im Elitenetzwerk Bayern an der Universität Bayreuth teil.



Die beiden Teilnehmer an der 70. Lindauer Nobelpreisträgertagung haben schon während ihrer Schulzeit wiederholt mit großem Erfolg an regionalen, nationalen und internationalen Physik-Wettbewerben teilgenommen. Dabei wurden sie am Schülerforschungszentrum (SFZ) der Universität Bayreuth wissenschaftlich betreut. Während ihres anschließenden Physik-Studiums in Bayreuth setzten sie sich wiederum sehr erfolgreich für die Förderung von Schüler*innen ein. Das SFZ ist eine Einrichtung der TechnologieAllianzOberfranken (TAO), in der die vier oberfränkischen Hochschulen – die Universitäten Bamberg und Bayreuth sowie die Hochschulen für angewandte Wissenschaften Coburg und Hof – kooperieren.

F.E.: Dabei muss man berücksichtigen, dass wissenschaftliche Disziplinen auf verschiedenen Skalen arbeiten. Die Mikrobiologie gewinnt beispielsweise neue Erkenntnisse darüber, wie sich ein Virus auf zellulärer Ebene verhält, aber dies bedeutet nicht, dass sie deshalb kompetent ist, allgemeine Fragen über das Leben der Menschen zu beantworten. Um derartige Aussagen treffen zu können, müssten Forschungsergebnisse aus verschiedenen Disziplinen

zusammengeführt werden, und auch dann bleibt es sehr schwierig.

Die Gründe dafür, weshalb wir der Wissenschaft vertrauen können und sollten, liegen auch nicht oder jedenfalls nicht primär in Aussagen, die einen aktuellen Erkenntnisstand widerspiegeln. Viel wichtiger sind die erprobten, rational begründeten, international anerkannten Verfahren, mit denen die Wissenschaft ihre Forschungsergebnisse erzielt. Dazu gehört insbesondere auch die ständige Bereitschaft, frühere Aussagen im Licht neuer Erkenntnisse zu modifizieren oder zu verwerfen. Und ebenso die Fähigkeit, sich in der wissenschaftlichen Arbeit von eigenen Vorurteilen und Wünschen zu lösen und unvoreingenommen an die jeweiligen Forschungsthemen heranzugehen. Dies sind entscheidende Kriterien für die Qualität der Wissenschaft, und nicht eine vermeintliche Unumstößlichkeit ihrer Aussagen.

Gab es während der Tagung Vorträge oder Fachdiskussionen, in denen über Ungewissheit in aktuellen Forschungsgebieten der Physik gesprochen wurde?

J.L.: Ja, beispielsweise im Vortrag des Münchner Astrophysikers Reinhard Genzel, der 2020 den Physik-Nobelpreis für die Entdeckung des supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße bekommen hat. Schon vor vielen Jahrzehnten wurde vermutet, dass dieses Schwarze Loch existiert, aber erst 2018 gab es für die bis dahin erzielten Messergebnisse keine andere plausible Erklärung mehr. Genzel hat gezeigt, dass seine Entdeckung sich dem schrittweisen Ausschluss alternativer Erklärungsmöglichkeiten verdankt und insofern das Ergebnis einer fortgesetzten Verringerung von Ungewissheit ist. Und bis heute gibt es ungeklärte Fragen, die sich niemals beantworten lassen. Denn wir können nicht in ein Schwarzes Loch hineinfliegen und die nötigen Messungen vornehmen – und selbst wenn wir es könnten, wäre eine Rückkehr zur Erde ausgeschlossen. Ein anderes Beispiel ist die israelische Biochemikerin Ada Yonath, die 2009 den Chemie-Nobelpreis für die Erforschung des Ribosoms erhielt. Mehr als zehn Jahre lang hat sie beharrlich, gegen alle Zweifel aus ihrem fachlichen Umfeld, ihre Forschungsarbeiten fortgesetzt – bis sie schließlich mithilfe der Kryo-Elektronenmikroskopie die ersten Ribosomenstrukturen aufklären konnte. Überhaupt

ist es vielen Laureaten so ergangen, dass sie zunächst als mutige Einzelne ihren wissenschaftlichen Interessen nachgegangen sind und erst später große Wertschätzung in der Fachwelt erfahren haben.

F.E.: Eine grundlegende physikalische Frage, die sich voraussichtlich nie aufklären lässt und während der Tagung wiederholt zur Sprache kam, betrifft die Quantenmechanik. Es gibt zwei Arten von Interpretationen der Quantenmechanik, die sich darin unterscheiden, wie die Theorie ins Verhältnis zur realen Welt gesetzt wird. Die Unsicherheit einer Messung wird im einen Fall so verstanden, dass sie lediglich die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses anzeigt. Im anderen Fall wird sie als Ungewissheit aufgefasst, innerhalb einer unendlich großen Zahl möglicher Welten die reale Welt identifizieren zu können. Beide Interpretationen sind miteinander vereinbar, und die auf ihrer Basis gewonnenen Aussagen sind äquivalent. Folglich lässt sich gar nicht entscheiden, welche Interpretation „wahr“ oder „falsch“ ist.

J.L.: Sofern Ungewissheit darin begründet ist, dass unser Wissen an Grenzen stößt, lassen sich in der Physik zwei Arten von Ungewissheit unterscheiden: Zunächst einmal ist der Bereich der Fragen, die wir wissenschaftlich beantworten können, durch die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Forschungstechnologien begrenzt.

„Uns ist immer nur ein sehr begrenzter Ausschnitt des Universums zugänglich, in dem wir durch Messungen zu neuen Erkenntnissen vordringen können.“

Technischer Fortschritt kann aber dazu beitragen, diese Grenzen zu verschieben: Lange Zeit galt die von Ernst Abbe im 19. Jahrhundert definierte Auflösungs Grenze von

Mikroskopen als unüberwindbar, aber heute gibt es die Superauflösende Einzelmolekülspektroskopie, mit der sich sogar die Abstände zwischen einzelnen Molekülen messen lassen. Es gibt aber auch Grenzen des Wissens, die uns die Natur setzt. Was sich in den Schwarzen Löchern des Universums abspielt, was sich vor dem Urknall ereignet hat und ob es jenseits unseres Universums etwas gibt, wovon man sagen könnte, dass es existiert – dies alles sind Fragen, die wir Menschen prinzipiell nicht beantworten können. Uns ist immer nur ein sehr begrenzter Ausschnitt des Universums zugänglich, in dem wir durch Messungen zu neuen Erkenntnissen vordringen können.

Wie beeinflussen diese Grenzen des Wissens die Einstellung von Wissenschaftler*innen zu ihren Forschungsarbeiten?



■ Abb. 1: Aus Radioaufnahmen des Event Horizon Telescope berechnete Darstellung, die das supermassereiche Schwarze Loch der Galaxie M87 zeigt (Foto: wikimedia commons).

F.E.: Wer heute in den Naturwissenschaften unterwegs ist und sich der eigenen Grenzen bewusst ist, kennt die Dynamik des wissenschaftlichen Fortschritts und wird sich hüten, aktuelle Erkenntnisse als letztgültige Wahrheiten darzustellen. Immer bleiben ungeklärte Fragen und sehr oft gibt es auch Alternativen, die nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden können – zum Beispiel dann, wenn Theorien, Modelle oder Daten verschieden interpretierbar sind. Auch während der Tagung war den Nobelpreisträger*innen eine gewisse vorsichtige Grundhaltung anzumerken, die aber keineswegs im Widerspruch stand zu ihrer deutlich spürbaren Aufgeschlossenheit für neue ungewöhnliche Ideen und Forschungsansätze.

J.L.: Gute Wissenschaftler*innen zeichnen sich immer auch dadurch aus, dass sie – wenn sie zum Beispiel wegweisende Entdeckungen publizieren – auch die unklaren und unsicheren Punkte benennen. Sie reflektieren darüber, unter welchen Bedingungen das ihren Forschungsergebnissen zugrunde liegende Modell scheitern würde oder in seiner Gültigkeit eingegrenzt werden müsste. Jedes Modell und jede Theorie abstrahiert bis zu einem gewissen Grad von der realen Welt, und es bleibt immer eine Aufgabe zu überprüfen, wie die Wirklichkeit dadurch abgebildet wird. Dies gilt nicht zuletzt auch für Naturkonstanten, beispielsweise die Gravitationskonstante, welche die Stärke der Gravitationskraft beschreibt. Neueste Messtechniken erlauben es uns mittlerweile, die Gravitation zwischen Objekten zu ermitteln, die nicht schwerer als ein Gramm sind. Vielleicht können wir die Gravitationskonstante eines Tages mit größerer Genauigkeit bestimmen als heute.

F.E.: Gleichzeitig – und dieser Aspekt wird zunehmend wichtig – ist die physikalische Fachwelt sehr darauf bedacht, nicht voreilig sensationelle Entdeckungen zu verkünden. Deshalb versucht man die Wahrscheinlichkeit zu quantifizieren, die erreicht sein muss, damit man mit hinreichender Sicherheit davon ausgehen kann, dass Auffälligkeiten in Messreihen nicht auf zufälligen statistischen Schwankungen beruhen, sondern systemische Ursachen haben. Hierfür dienen die sogenannten Sigma-Werte. So konnte im Jahr 2012 im Kernforschungszentrum CERN in Genf das Higgs-Boson nachgewiesen werden. Dies ist ein Teilchen, das anderen Teilchen Masse verleiht. Erst als die beteiligten Wissenschaftler*innen es mit einem Wert von „5-Sigma“ für unwahrscheinlich erklären konnten, dass die fraglichen Phänomene auf statistische Abweichungen zurückzuführen sind, galt die Existenz von Higgs-Bosonen als bewiesen. Und erst danach wurde die Entdeckung mit einem Nobelpreis ausgezeichnet.

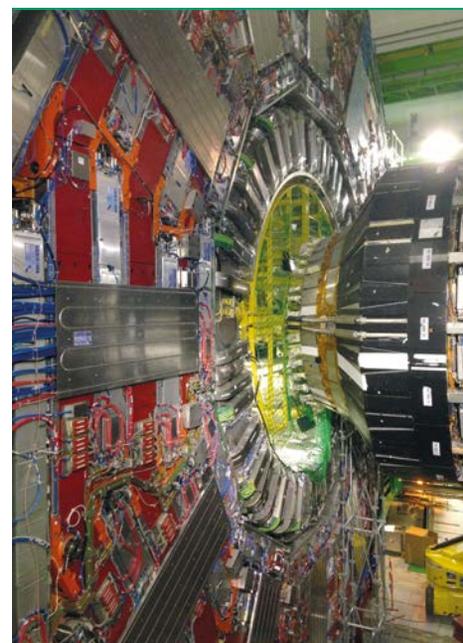
Gibt es heute in der Physik eine Forschungsrichtung, die auf besonders spannende, vielleicht sogar spektakuläre Erkenntnisse und Entwicklungen hinarbeitet?

F.E.: Künstliche Intelligenz ist ein zukunftsweisendes Thema, das keineswegs nur von der Informatik, sondern beispielsweise auch in der Physik bearbeitet wird. Zunehmend rückt heute die Frage in den Fokus: Ist es möglich, einen künstlichen Wissenschaftler zu erschaffen, der imstande ist, Forschungsarbeiten zu konzipieren und durchzuführen, neue Erkenntnisse zu generieren, Unwissenheit zu minimieren und Risiken abzuschätzen? Vielleicht werden wir eines Tages imstande sein, wissenschaftliche Forschung an solche roboterartige Wesen zu delegieren – in einem Umfang, der uns unvorstellbar scheint.

Ist es heute schwierig, Ideen und Forschungsergebnisse, die sich auf bisher unbekanntes Terrain vorwagen, in namhaften internationalen Zeitschriften zu publizieren?

J.L.: Die Redaktionen dieser Zeitschriften sind in der Regel an einem hohen Impact-Faktor interessiert, der ausdrückt, wie oft die von ihnen publizierten Forschungsarbeiten in anderen wissenschaftlichen Veröffentlichungen zitiert werden. Daher gilt er zu Recht als Kriterium für den Einfluss einer Zeitschrift in der Scientific community. Nun ist aber von Beiträgen, die von sehr ungewohnten Forschungsansätzen ausgehen oder tradierte Auffassungen von Grund auf infrage stellen, kein großes und rasches internationales Echo zu erwarten. Häufig stellt sich eine signifikante Wirkung erst nach vielen Jahren ein. Und insofern haben die Redaktionen eher ein geringes Interesse an einer Veröffentlichung solcher Beiträge.

F.E.: Hinzu kommt die Befürchtung, der eigene Ruf werde beschädigt, falls sich eine Publikation ungewöhnlicher Thesen schon bald als unsinnig und leicht widerlegbar erweist. Dank der ständig wachsenden Zahl von Open Access-Zeitschriften hat sich die Situation allerdings merklich verbessert. Auch die Lindauer Nobelpreisträgertagung hat sich in dieser Hinsicht verdient gemacht: Während der Tagung im Jahr 2018 hat die Nobelpreisträgerin Elizabeth Blackburn die anwesenden 600 jungen Wissenschaftler*innen dazu aufgerufen, neue Ideen für eine „Open Science“ – also für eine offene, kooperative und nachhaltige Wissenschaft – zu entwickeln. Daraus sind schließlich die „Lindau Guidelines“ hervorgegangen, die im Rahmen der Jubiläumstagung 2021 vorgestellt wurden und breite Unterstützung fanden.



■ Abb. 2: Der am CERN in Genf für das Compact-Muon-Solenoid-Experiment (CMS) eingesetzte Teilchendetektor, mit dem das Higgs-Boson erforscht wird (Foto: Tighef / wikimedia commons).

LINKTIPP

<https://lindauguidelines.org/>



■ Christoph K. Thomas
Alexander Schulz

Licht ins ungewisse Dunkel der Polarnacht bringen

Der arktischen Verstärkung des Klimawandels auf der Spur

■ Polarlichter sind in Ny-Ålesund am 79. Breitengrad eine Seltenheit und bildeten eine eindrucksvolle Kulisse für das Arktisexperiment NYTEFOX (Foto: Christoph Thomas). Kleines Bild: Das Logo des NY-Ålesund TurbulencE Fiber Optic eXperiment[®], kurz: NYTEFOX (Design: Christoph Thomas).

Die menschengemachte Klimaveränderung ist Fakt. Sie ist durch ein Netzwerk von Wetterbeobachtungen über lange Zeiträume und alle Klimazonen messbar belegt: Die Erkenntnis der Veränderungen von Temperatur, Niederschlag und Extremereignissen ist unumstößlich. Doch trotz dieser Gewissheit und des spürbaren Einflusses von Klimaveränderungen auf unser tägliches Leben ist Vieles noch ungewiss. Die Prozesse, die den Klimawandel verursachen und weiterhin antreiben, sind längst nicht wissenschaftlich hinreichend verstanden. Das trifft in besonderem Maße auf die polaren Gebiete der Nord- und Südhemisphäre zu, die überdurchschnittlich stark von Klimaveränderungen betroffen sind. Dieses unter der Bezeichnung „polare Verstärkung“ bekannte Phänomen genauer zu verstehen, ist unabdingbar, um den Klimaveränderungen entgegenwirken und geeignete Anpassungsstrategien entwickeln zu können.

Ungewöhnlich komplex: die Grenzschicht in den Polargebieten

Wetter- und Klimamodelle haben sich in der Klimaforschung immer wieder als virtuelle Laboratorien und Hypothesentester bewährt. Doch die auf der Basis dieser Modelle entwickelten Vorausberechnungen lassen sich auf die Polarregionen nicht einfach übertragen, die Übereinstimmung der Modelle ist hier geringer als in anderen Klimaregionen. Zu speziell sind hier die klimatischen Prozesse ausgeprägt, und es liegen nur wenige Beobachtungen aufgrund der schweren Zugänglichkeit vor. Welche Modelle für deren Verständnis besonders aufschlussreich sind, ist noch keineswegs klar. Diese Ungewissheit folgt aus dem unzureichenden Verständnis des biophysikalischen Energie-, Wärme- und Kohlenstofftransports im Klimasystem Erde. In diesem System spielt die atmosphärische Grenzschicht eine bedeutende Rolle. Es handelt sich hierbei um die unterste Schicht der Erdatmosphäre, die unmittelbar an die Erdoberfläche angrenzt. Diese ungefähr 1,5 bis zwei Kilometer dicke Luftschicht verbindet alle Teile der Erdoberfläche miteinander, enthält fast die Gesamtheit allen Lebens über Land und wird daher oft als „kritische Zone“ bezeichnet. An den Polen verhält sich diese Grenzschicht – bedingt durch den jahreszeitlichen Wechsel zwischen der Polarnacht im Winter und dem Polartag im Sommer – grundlegend anders als in Klimazonen, die an jedem Tag zumindest wenige Stunden lang dem Sonnenlicht ausgesetzt sind. Vor allem während der Polarnacht ist die Grenzschicht im Vergleich zu ihrem nächtlichen Äquivalent in

mittleren Breiten langlebiger, aber auch gegenüber Störungen sensibler.

Diese Sensitivität beruht auf der Tatsache, dass in der atmosphärischen Grenzschicht polarer Gebiete auf kleinem Raum viele sehr verschiedene Oberflächen wechselwirken: offenes Meer mit eisbedeckten Meeresflächen und mit Land, das teils von Vegetation, von Schnee, von gefrorenem Boden oder von flüssigem Wasser bedeckt wird. Infolgedessen ist das Zusammenspiel der Transportprozesse in der bodennahen Luftschicht ungewöhnlich kompliziert: Diese Prozesse können einander verstärken oder abschwächen. In der Forschung werden diese Wechselwirkungen als Rückkopplung bezeichnet. So können zum Beispiel schmale Risse im Meereis oder kleine schneefreie Landflächen zu überproportionaler Erwärmung, zum Abschmelzen und zur Verdunstung in ganzen Landschaften führen. Kurzfristige Störungen können sich so wechselseitig aufschaukeln und zu abrupten Veränderungen führen.

NYTEFOX – ein einzigartiges Feldexperiment in der Arktis

Genau hier setzt das Feldexperiment NYTEFOX an, das Akronym steht für „NY-Ålesund Turbulence Fiber Optic eXperiment“. In diesem Forschungsvorhaben kooperieren die Professur für Mikrometeorologie der Universität Bayreuth und die Forschungssektion Physik der Atmosphäre am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Potsdam. Während der Übergangszeit zur Polarnacht im Frühjahr 2020 brach ein gemeinsames

LINKTIPPS

Homepage der deutsch-französischen Forschungsbasis AWIPEV, die gemeinsam vom Alfred-Wegener-Institut (AWI) und dem französischen Institut polaire français Paul-Émile Victor (IPEV) betrieben wird: www.awipev.eu

Homepage des internationalen Drifteisexperimentes MOSAiC, das seit Herbst 2020 federführend vom Alfred-Wegener-Institut (AWI) durchgeführt wird: www.awi.de/im-fokus/mosaic-expedition.html

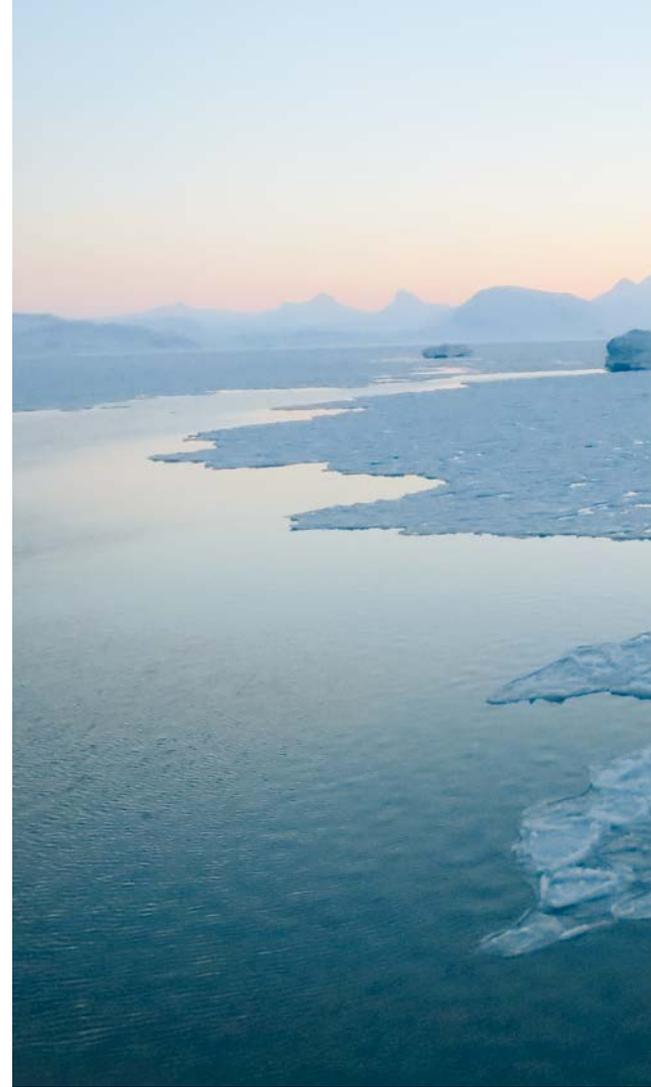
■ Abb. 1: NYTEFOX war eine Kooperation der Professur für Mikrometeorologie der Universität Bayreuth (UBT) und der Forschungssektion Physik der Atmosphäre des Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI): Christoph Thomas (UBT), Alexander Schulz (AWI), Lena Pfister (UBT), Marie Zeller (AWI), Daniela Littmann (AWI), Jannis Huss (UBT) (v.l.n.r.) (Foto: Jannis Huss).



■ *Abb. 2 (unten): Das Hauptgebäude der nach dem Polarforscher Carl Koldewey benannten Station in Ny-Ålesund. Es ist heute in die deutsch-französische Forschungsstation AWIPEV integriert. Davor befindet sich ein Denkmal zu Ehren des Polarforschers Roald Amundsen (Foto: Christoph Thomas).*

■ *Abb. 3 (unten): NYTEFOX verwendete das bislang größte Netzwerk an Lichtwellenleitern für die Temperatur- und Windmessung zur Erforschung der bodennahen Transportprozesse (Foto: Harald Sodemann).*

Team von insgesamt sechs Wissenschaftler*innen und Studierenden zur Inselgruppe Svalbard auf (der historische Name Spitzbergen wurde bereits im Svalbard Treaty von 1925 offiziell abgeändert). Ziel der Reise war die deutsch-französische Forschungsstation AWIPEV in Ny-Ålesund am 79. Breitengrad. Ny-Ålesund ist eine der nördlichsten ganzjährig bewohnten Siedlungen der Welt. Ursprünglich für den Kohlebergbau gegründet, dient sie seit den 1960er Jahren als Basis für internationale Polarforschung. Hier sollte das NYTEFOX mithilfe modernster Lichtwellenleitertechnik Helligkeit in das Verständnisdunkel der polaren Grenzschicht auf Svalbard bringen.



Den Schlüssel zum Erfolg dieses einzigartigen Experiments war die Tatsache, dass sich die Kompetenzen der beiden Forschungspartner passgenau ergänzten. Die Professur für Mikrometeorologie an der Universität Bayreuth ist weltweit führend in der Entwicklung und Anwendung optischer Lichtwellenleiter, die für die Temperatur- und Windmessung eingesetzt werden. Das AWI wiederum verfügt als Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung über eine international herausragende Infrastruktur und Logistik auf diesen Gebieten.

Beide Partner hatten bereits im Herbst 2018 beim Experiment FLYFOX-A („FLYing Fiber Optic eXperiment – Arctic“) zusammengearbeitet. Hier ging es darum, die Lichtwellenleitertechnik an einem Fesselballon zu installieren und in der Arktis für die Internationale Drifteisexpedition MOSAIC zu erproben. Im Mittelpunkt des Experiments NYTEFOX stand nun die Frage, welche Transportprozesse zum Austausch von Energie und Wärme in der einzigartig kalten Landschaft am Kongsfjord in Svalbard führen. Neue Erkenntnisse zu diesen Prozessen sind entscheidend, um zu einem besseren Verständnis der atmosphärischen Grenzschicht in der Arktis vorzudringen. Darüber hinaus zielte NYTEFOX darauf ab, zwei weitere Ungewiss-

LITERATURTIPP

M.-L. Zeller et al.: The NY-Alesund Turbulence Fiber Optic eXperiment (NYTEFOX): Investigating the Arctic boundary layer, Svalbard. Earth System Science Data (2021), 13(7), 3439-3452. DOI: 10.5194/essd-13-3439-2021.



■ Abb. 4: Morgendämmerung über dem Kongsford auf Svalbard: Infolge des gleichzeitigen Auftretens von offenem Wasser, Meereis und Land mit Schnee, Vegetation und Gletschern ist der Wärme- und Energietransport im arktischen Klimasystem besonders kompliziert (Foto: Christoph Thomas).

heiten zu überwinden: Die Forscher*innen wollten herausfinden, ob die Lichtwellenleitertechnik den extremen Bedingungen der arktischen Polarnacht gewachsen ist. Und sie wollten Klarheit darüber gewinnen, ob die Netzwerke der Lichtwellenleiter in dem streng geschützten arktischen Ökosystem auf Svalbard sicher aufgebaut und betrieben werden können.

Die Besonderheit im Aufbau von NYTEFOX bestand darin, dass hier mehrere Forschungstechniken kombiniert wurden:

- Ein Netzwerk von Lichtwellenleitern, die mit einer neuartigen, als „Fiber-Optic Distributed Sensing (FODS)“ oder „Distributed Temperature Sensing (DTS)“ bezeichneten Technik arbeiten. Die Messung der Temperatur in der Luft, im Schnee und im Wasser kann aufgrund dieser Technik kombiniert werden mit einer gleichzeitigen Messung der Luftbewegungen – und zwar mit einer hohen zeitlichen (Sekunden) und räumlichen (Dezimeter) Auflösung innerhalb von mehreren hundert Metern. So lassen sich einzelne Temperatursignale und Luftbewegungen sichtbar machen, die mit herkömmlichen Punktmessverfahren nur schwer oder gar nicht erkennbar sind.

- Ultraschall-Anemometer und bodengestützte schallbasierte Techniken der Fernerkundung, wie sie herkömmlicher Weise eingesetzt werden, um an ausgewählten Punkten die Windgeschwindigkeit zu messen.

Dieses Netzwerk von Lichtwellenleitern ist das größte seiner Art, das in der arktischen Klima- und

■ Abb. 5: Störungen im empfindlichen Ökosystem der Arktis in Svalbard konnten vermieden werden. Die Rentiere vor Ort mieden den Messaufbau und ästen friedlich außerhalb der Lichtwellenleiterkabel (Foto: Christoph Thomas).



AUTOREN

Prof. Dr. Christoph Thomas ist Professor für Mikrometeorologie an der Universität Bayreuth.



Dr. Alexander Schulz ist Mitglied der Forschungssektion Physik der Atmosphäre am Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Potsdam.



Wetterforschung bisher eingesetzt wurde. Die Aufbauarbeiten waren ein Kraftakt und dauerten insgesamt 14 „Nächte“. Sie wurden Anfang Februar 2020 zunächst durch eine überdurchschnittlich starke Kälte mit Lufttemperaturen von minus 30 Grad Celsius erschwert. Erst gegen Ende des Experiments Mitte März stellten sich mildere Temperaturen um minus zehn Grad Celsius ein. Die Forschungsstation ist zwar nicht weit vom Nordpol entfernt, aber weil sie zugleich nahe am Polarmeer liegt, sind die Lufttemperaturen hier vergleichsweise mild. Sie liegen im Januar zwischen minus 17 und minus vier Grad Celsius im langjährigen Mittel.

Forschung in polarer Kälte

Die kalten Temperaturen, die zeitweise mit heftigen Winden und Schneetreiben einhergingen, sowie die Dunkelheit und das Dämmerlicht „tagsüber“ waren eine große Herausforderung für die Mitglieder des Forschungsteams, die aber nach einer Eingewöhnungsphase zielstrebig und gut gelaunt zusammenarbeiteten. Stillstehen und Starren in den Nachthimmel während der Eisbärenwache und körperliche Bewegung beim Aufbau und Betrieb der Messgeräte wechselten häufig einander ab, so dass lange Arbeitszeiten in der Kälte möglich waren.

Die tiefen Temperaturen und die Schneedrift stellten auch die Messtechnik auf die Probe. Sie forderten das Team dazu heraus, selbst bei vergleichsweise einfachen Tätigkeiten neue Wege zu beschreiten. So musste beispielsweise ein Verfahren entwickelt werden, um die Abspannseile für die Stützkonstruktionen der Lichtwellenleiter im breithart gefrorenen Permafrostboden so zu verankern, dass sie darin einfrieren. Dies gelang mit einer batteriebetriebenen Schlagbohrmaschine und mit Tellerkopfschrauben – samt einem Schluck heißen Wassers aus der Thermoskanne. Um die 1,2 Millimeter dünnen Lichtwellenleiterkabel mit ihren nur 0,3 Millimeter starken Edelstahlwänden zu befestigen, wurden Cocktailspieße aus Bambus und mit Moosgummi umwickelte Räder eines Tretrollers eingesetzt. Die Wärmeleitpaste zwischen den massiven Kupferblöcken der Referenzbäder entpuppte sich bei minus 30 Grad Celsius als untrennbare Verklebung und musste nach Auftauen im Labor entfernt werden.

Erfreulicherweise fanden die äsenden Rentierherden Wege, um dem rund 300 mal 300 Meter großen Netzwerk der Lichtwellenleiter auszuweichen: Kein Tier verding sich mit Geweih oder Beinen in den Kabeln. Von Rentieren umgestoßene Stützen konnten ohne Beschädigung und Datenverlust wieder aufgerichtet werden. Auch im Hinblick auf diese Aspekte der Ungewissheit war NYTEFOX ein Erfolg.

■ *Abb. 6: Die Eigenschaften der Erdoberfläche ändern sich durch Stürme und Schneedrift ständig, so dass der Messaufbau häufig kontrolliert werden muss. Mindestens eine Person hält immer Eisbärenwache (Foto: Christoph Thomas).*





Neue Einsichten in den Wärmetransport

Die Auswertung der Messdaten wird voraussichtlich erst im Herbst 2021 abgeschlossen sein. Sie hat aber schon jetzt eine Vielzahl bisher unentdeckter Phänomene in der arktischen Grenzschicht zu Tage gefördert, die zum polaren Wetter- und Klimageschehen beitragen. Vor allem bei schwachem Wind und klarem Himmel sind die örtlichen Berge mit ihren Gletschern eine Quelle für Kaltlufttropfen, die von der Schwerkraft beschleunigt an den Hängen in die Täler und weiter in Richtung Fjord heruntergleiten. Diese langsam fließenden Kaltluftströme von wenigen Dezimetern Mächtigkeit werden unterwegs von kleinen Unebenheiten der schneebedeckten Oberfläche gelenkt oder gestaut – sei es durch Erdwälle, flache Bachufer oder den Bahndamm der ehemaligen Kohleförderbahn. Sie führen auf kleinem Raum zu starken Temperaturunterschieden von bis zu zehn Grad.

Diese Unterschiede können zusammen mit der Luftbewegung den Wärmetransport kurzfristig verstärken oder unterdrücken. Sie können also die Erdoberfläche an die Luft ankoppeln oder abkoppeln. Mit der Messung dieser Einflüsse, die sich aus dem pulsierenden Zusammenspiel von Topographie und Oberfläche ergeben, sind herkömmliche Verfahren überfordert. Der feinskalige Wärmetransport führt dazu, dass sogar identische Messverfahren innerhalb von wenigen hundert Metern stark unterschiedliche und scheinbar widersprüchliche Ergebnisse liefern. Diese Diskrepanzen stehen dem Vergleich zwischen Modellierung und Beobachtung im Weg. Sie erschweren auch die Anwendung mathematischer Ansätze, wie sie in Wetter- und Klimamodellen nor-

malerweise für die Berechnung von Wärme- und Energietransporten eingesetzt werden.

Diese Diskrepanzen waren zwar bekannt, aber erst das Feldexperiment NYTEFOX ermöglicht eine empirisch fundierte Erklärung. Mithilfe der Lichtwellenleitertechnik wurden auch einzelne Schwerewellen, sogenannte Solitone, dokumentiert. Diese bewegen sich unabhängig von der Windströmung und heben die bodennahe, bis zu acht Grad kältere Luft zunächst an. Dann aber führen sie beim Zurückgleiten kurzzeitig zu verstärkter Turbulenz und Durchmischung.

■ Abb. 7 (links): Die Bodenanker für die Stützkonstruktionen der Lichtwellenleiterkabel im harten Permafrostboden zu verankern, war eine besondere Herausforderung. Die Ungewissheiten zu überwinden, die mit dem Einsatz dieser neuen einzigartigen Messtechnik unter den extremen arktischen Bedingungen verbunden waren, war ein Ziel des Feldexperiments (Foto: Christoph Thomas).

■ Abb. 8 (rechts): Die nur 1,3 Millimeter starken Lichtwellenleiterkabel bei Lufttemperaturen um minus 30 Grad Celsius zu installieren, forderte Geschick, Ausdauer und gute Handschuhe. Im Hintergrund: der Lichtschein der Eisbärenwache (Foto: Christoph Thomas).

„Das im Projekt NYTEFOX errichtete Netzwerk von Lichtwellenleitern ist das größte seiner Art, das in der arktischen Klima- und Wetterforschung bisher eingesetzt wurde.“

Fazit

Wie die in NYTEFOX gewonnenen Erkenntnisse am besten in moderne Wetter- und Klimamodelle eingebracht werden können, wird die weitere Forschung zeigen. Eines ist jedoch bereits heute klar: Die Ungewissheit, die einem lückenlosen Verständnis der arktischen Grenzschicht und des mit ihr eng verbundenen Klimasystems der Erde entgegensteht, wird auch in Zukunft eine wichtige Triebfeder für eine gemeinsame Polarforschung der Universität Bayreuth und des Alfred-Wegener-Instituts sein.

■ Abb. 9: Halterung der Lichtwellenleiter (Foto: Christoph Thomas).





NATUR & TECHNIK

■ Aljoscha Zahn
Tobias Baumann
Stephan Tremmel
Frank Rieg

Technische Systeme sicher auslegen

Berechnung und Simulation
machen Ungewissheiten
beherrschbar

■ Blick ins Innere des Schiffshebewerks in Niederfinow, am östlichen Ende des Oder-Havel-Kanals. Es war 2007 das erste Bauwerk, das von der Bundesingenieurkammer die Auszeichnung „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland“ erhielt, und das älteste noch in Betrieb befindliche Schiffshebewerk Deutschlands (Foto: Steffen Zahn / wikimedia commons / CC-BY-2.0).

Die Entwicklung technischer Systeme ist ein Prozess, der kontinuierlich von Ungewissheit begleitet wird. Schon während der Planung, wenn die Anforderungen an ein neues Produkt sowie Terminvorgaben und ein Kostenrahmen zu prüfen sind, treten Unsicherheiten auf. Dies setzt sich fort bei der Konzeptfindung, die sich insbesondere an den zu realisierenden Funktionen des Produkts orientiert, und in der anschließenden Entwurfsphase, bei der es um das grundlegende Design des Produkts geht. Bei jedem dieser Entwicklungsabschnitte stehen die für die Konstruktion verantwortlichen Fachleute vor der Herausforderung, die Quellen von Unsicherheiten zu identifizieren und sie durch geeignete Lösungsstrategien zu minimieren, im Idealfall sogar zu beseitigen. Hierbei kommt modernen Berechnungs- und Simulationsmethoden eine Schlüsselrolle zu.

Ein konkretes Beispiel: Im Jahr 2015 stürzte in der Nähe von Graz eine im Bau befindliche Brücke auf die darunter verlaufenden Bahngleise (Abb. 1). Ursächlich war ein zu schwach ausgelegtes Hilfsgerüst, das die Aufgabe hatte, das 800 Tonnen schwere Stahlbetonelement zu tragen. Bei der Dimensionierung des Gerüsts ist lediglich die Betonierlast einbezogen worden, nicht aber die höhere Belastung nach dem Vorspannen des Brückenelements. Mutmaßlich führten Vibrationen, die ein durchfahrender Zug verursachte, dann zur Überlastung eines Gerüstpfeilers. Der Einsturz verursachte einen Schaden von rund fünf Millionen Euro, der sich mit einer belastungsgerechten Auslegung und einer besseren Kommunikation zwischen den Beteiligten hätte vermeiden lassen.¹



Allgemein tritt Ungewissheit in der Entwicklung technischer Systeme immer dann auf, wenn Parameter nicht bekannt sind oder wenn sich der Wert eines Parameters nicht exakt definieren lässt. Quellen der Ungewissheit sind dabei nicht allein die Kräfte der Natur, wie Winde, Niederschläge oder Erdbeben, sondern beispielsweise auch die Qualität von Werk-

<p>Anforderungen?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Belastung ▪ Lebensdauer ▪ Umwelteinfluss <p>Werkstoffe?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eigenschaften ▪ Bezug von Daten 		<p>Modellierung?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Wahl des Modells ▪ Idealisierung ▪ Validierung <p>Fertigung?</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertigungsverfahren ▪ Toleranzen
--	--	---

■ Abb. 2: Unsicherheiten bei der Entwicklung technischer Produkte (Foto: ist).

stoffen, Herstellungsverfahren oder Umwelteinflüsse wie korrosiv wirkende Medien (Abb. 2). Berechnungen und Simulationen technischer Systeme ermöglichen es, Informationen über die Beanspruchbarkeit und die vorhandene Sicherheit zu gewinnen. Aber auch aus der Berechnung selbst ergeben sich neue Unsicherheiten, wenn beispielsweise Zweifel an der Richtigkeit des gewählten Berechnungsmodells oder an der korrekten Interpretation der Ergebnisse aufkommen. In diesen Fällen stehen für die Konstruktion eine ganze Reihe etablierter Methoden zur Verfügung, die den unterschiedlichen Quellen von Unsicherheit Rechnung tragen können:

„Die Finite-Elemente-Methode kann heute in nahezu allen technischen Bereichen zur Analyse relevanter Systemgrößen herangezogen werden.“

■ Häufig wird das Versagen eines Bauteils durch mechanische Beanspruchungen (Zug/Druck, Biegung, Torsion, Schub) verursacht, die zum Knicken, zu plastischer Verformung, zu Gewaltbruch oder zum Schwingbruch führen können. Die ertragbare Belastung oder Versagensgrenze hängt dabei vom eingesetzten Werkstoff ab. Um die Sicherheit gegen das Bauteilversagen zu erhöhen, wird ein sogenannter Sicherheitsfaktor in die Berechnung integriert. Über diesen Faktor wird die vom Werkstoff vorgegebene Versagensgrenze für ein Bauteil höher angesetzt, als es notwendig wäre. Ein Beispiel: Für ein Bauteil wird rechnerisch ermittelt, dass die Versagensgrenze nicht unter 200 N/mm² liegen darf. Wird nun ein entsprechender Werkstoff mit dieser Versagensgrenze (zum Beispiel die Fließgrenze oder die Zugfestigkeit) gewählt, ist eine Sicherheit von 1 gegeben. Ein Werkstoff mit einer Grenze bei 400 N/mm² bietet bereits die doppelte Sicherheit.

■ Unsicherheiten, die beispielsweise den Grad der Beanspruchung eines Bauteils im laufenden Betrieb betreffen, lassen sich anhand mathematischer Beschreibungen aus dem Bereich der Wahrscheinlichkeitstheorie reduzieren.

■ Abb. 1 (links): Einsturz einer Brücke in Graz im Jahr 2015: Der Schaden belief sich auf rund fünf Millionen Euro (Foto: wikimedia commons / The Adriatic Working Party / CC-BY-SA-4.0).

■ *Abb. 3: Regelwerke, die durch die Vorgabe von Normen oder Standards zur Sicherheit technischer Systeme beitragen, enthalten beispielsweise Abschätzungen maximaler Windgeschwindigkeiten, wie sie bei der Konstruktion von Windrädern im Hinblick auf die zu erwartende Windlast berücksichtigt werden sollten (Foto: photography-wildlife-de / ist).*



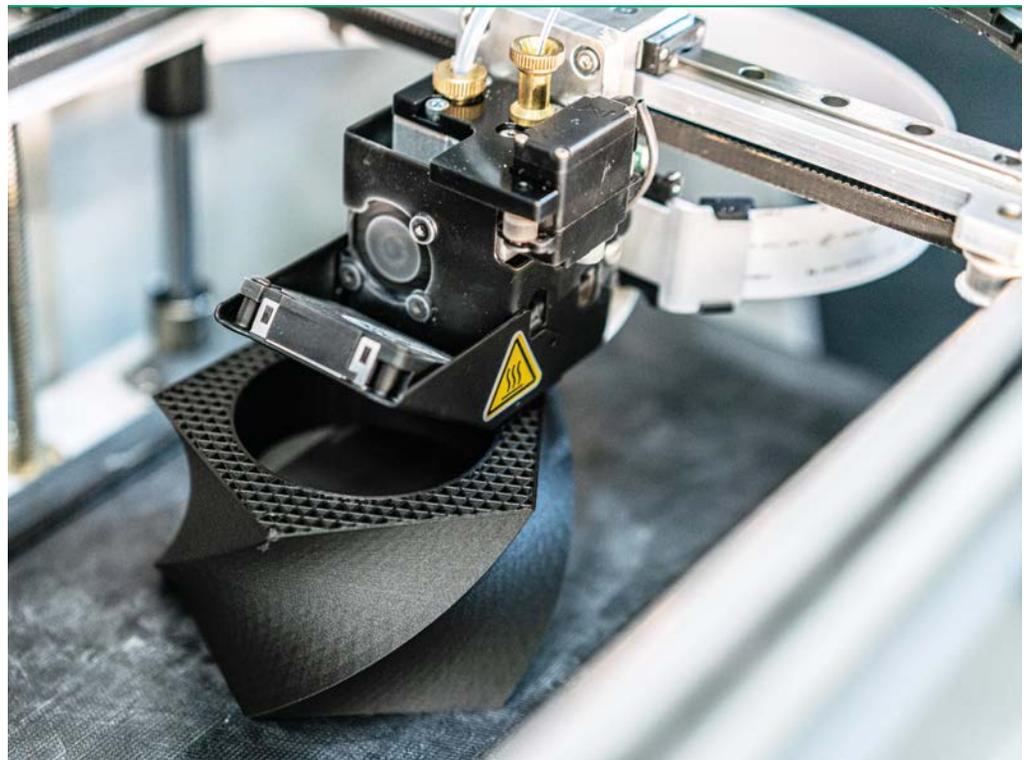
■ Wichtig ist auch zu wissen, welchen Einfluss eine unsichere Größe wie die Temperatur oder die Lastannahme auf das betrachtete System hat. Über eine Sensitivitätsanalyse kann festgestellt werden, wie empfindlich ein Berechnungsergebnis auf die Änderung verschiedener Eingabegrößen reagiert.²

■ Auch die korrekte Anwendung bewährter Standards, wie sie in Normen oder internen Unternehmensrichtlinien dokumentiert sind, macht es möglich, Unsicherheiten im Entwicklungsprozess zu reduzieren.³

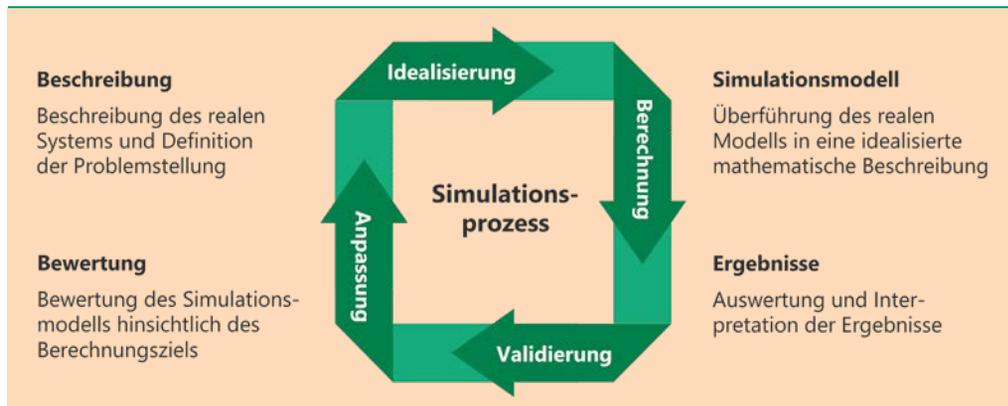
Kosten, Energie- und Ressourceneffizienz

Neben den Zielen, die sich auf die Betriebssicherheit und die Zuverlässigkeit eines technischen Systems oder eines Bauteils beziehen, müssen bei der Konstruktion auch vorgegebene Kostenziele erreicht werden.⁴ Gewissheit schaffende Iterationen im Entwicklungsprozess zwischen Konstruktion, Berechnung und Versuch müssen aus Kostengründen oftmals reduziert werden. Zugleich wächst die Anzahl der in die Entwicklung einzubeziehenden Varianten. Stetig steigende Leistungsanforderungen und ebenso der Wunsch, Energie und Ressourcen möglichst effizient zu nutzen, sorgen für Optimierungsbedarf an bestehenden Produkten oder erfordern gänzlich neue technische Lösungen. Auch in diesem Zusammenhang können Unsicherheiten auftreten, die es zu verringern gilt.

Erkenntnisse aus den Materialwissenschaften führen zu verbesserten oder neuen Werkstoffen. Innovative Technologien wie die additive Fertigung erlauben eine deutlich flexiblere Gestaltung von Bauteilen (Abb. 4). Infolgedessen lassen sich Produkte entwickeln, welche den vorhandenen Bauraum optimal ausnutzen und zudem leichter, thermisch höher beanspruchbar oder chemisch beständiger sind. Allerdings bergen neue Werkstoffe und neue Fertigungsverfahren aufgrund fehlender Erfahrung große Ungewissheit.



■ *Abb. 4: Die enorme Flexibilität der additiven Fertigung eröffnet neue Möglichkeiten in der Produktentwicklung – und birgt zugleich neue Ungewissheiten, die es zu beherrschen gilt (Foto: Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD).*



■ Abb. 5: Ablauf einer Simulation, in Anlehnung an Jonathan Smith: Quality Management in Engineering Simulation² (Grafik: Aljoscha Zahn).

Absicherung durch Simulation

Für die Entwicklung innovativer und kostengünstiger Produkte, die zugleich hohe Sicherheitsstandards erfüllen, ist daher eine zuverlässige Simulation des Betriebsverhaltens essentiell. Der Ablauf einer Simulation ist in der Regel ein iterativer Prozess (Abb. 5). In der Vorbereitungsphase kommt es darauf an, die Problemstellung zu beschreiben und systematisch alle geeigneten Berechnungsmodelle und Vorgehensweisen für die Lösungsfindung zu identifizieren. In der anschließenden Modellierung wird das Problem in Form einer mathematischen Beschreibung idealisiert und zudem, falls computerunterstützte Verfahren eingesetzt werden, digitalisiert. Auf der Basis des Berechnungsmodells muss anschließend mit einem geeigneten Verfahren eine Lösung generiert werden.

Viele Probleme und Wirkzusammenhänge können durch analytische Verfahren exakt gelöst werden. Ein Beispiel ist etwa die Absenkung eines Stahlbalkens an einem Lastangriffspunkt. Wenn allerdings die Anforderungen an die Detailtiefe der Modellierung steigen und gleichzeitig unterschiedliche Randbedingungen – wie etwa das Verhalten von Kontaktstellen oder eine Anisotropie des Materials – berücksichtigt werden müssen, sind analytische Beschreibungen oft nicht mehr möglich. Dann kommen vorzugsweise numerische Berechnungsmethoden zum Einsatz, die sich besonders für die Lösung komplexer Wirkzusammenhänge eignen.

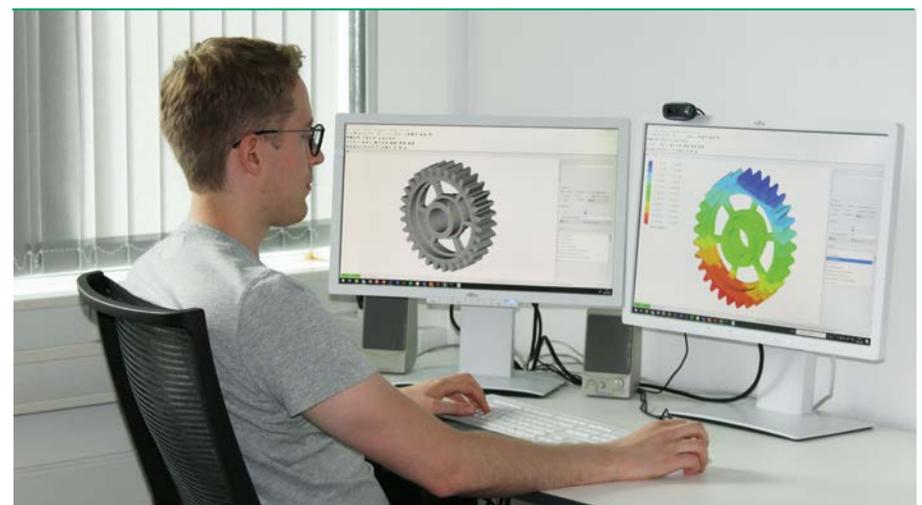
Gewissheit durch die Finite-Elemente-Analyse

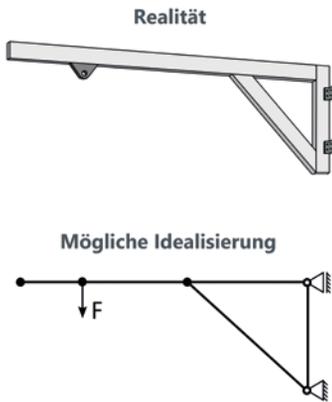
Die Finite-Elemente-Analyse hat sich als das Tool für die Analyse von Problemstellungen aus verschiedensten physikalischen Disziplinen etabliert.⁵ Die zu Grunde liegende Finite-Elemente-Methode

ist ein numerisches Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen, mit denen sich die meisten technischen Systeme adäquat beschreiben lassen. Hierfür wird das betrachtete Bauteil in eine Gruppierung endlich kleiner („finiter“) Elemente unterteilt. Wie sich jedes einzelne Element unter Last verformt, lässt sich mathematisch beschreiben. Daraus können das Verhalten des Bauteils und – wenn die Kontaktzustände mitberücksichtigt werden – auch das Verhalten ganzer Systeme bestimmt werden. Im Falle einer strukturmechanischen Berechnung stehen das Verformungsverhalten des Bauteils und kritische Spannungen im Vordergrund (Abb. 6). In

■ Abb. 6: Simulation mit der Finite-Elemente-Analyse am Beispiel eines Zahnrad – Verformung durch eine Linienlast im Zahneingriff. Die Farbskala rot-grün-blau hebt dabei die Verformung vom größten (rot) bis zum kleinsten (blau) Wert hervor (Grafik: Tobias Baumann & Aljoscha Zahn).

■ Abb. 7 (unten): Aljoscha Zahn M.Sc. berechnet die Verformung eines Zahnrad unter Belastung (Foto: Christian Wißler).





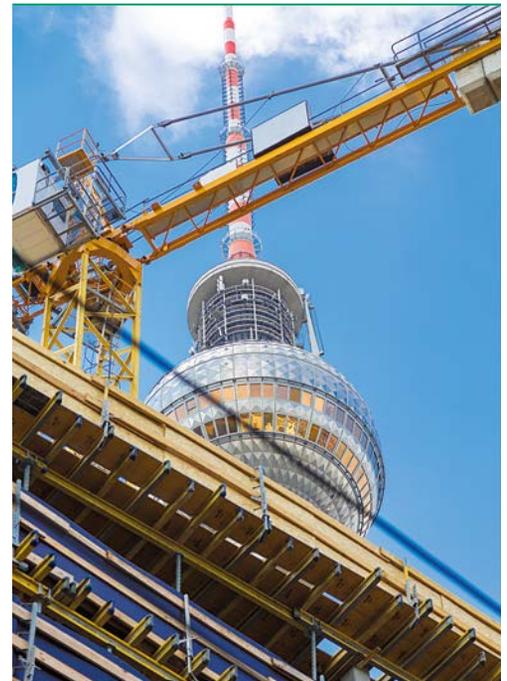
■ Abb. 8: Ausleger (oben) und eine mögliche Idealisierung für die Berechnung (unten) (Grafik: Aljoscha Zahn).

■ Abb. 9 (rechts): Bauarbeiten vor dem Berliner Fernsehturm (Foto: ArminStautBerlin / ist).

anderen Fällen geht es um die Frage, wie das Bauteil auf dynamische Anregungen reagiert oder wie sich die Temperatur in Folge eines aufgeprägten Wärmestroms verteilt. Auch hier führt die Finite-Elemente-Analyse zu präzisen, zuverlässigen Berechnungen.

Hardwarebedingte Grenzen und damit verbundene Einschränkungen in der Modellbildung werden seit den 1980er Jahren mit der Einführung von Mikroprozessoren und der generell steigenden Leistungsfähigkeit moderner Computer sukzessive abgebaut. Gleichzeitig findet eine stetige Weiterentwicklung der Finite-Elemente-Methode selbst statt. Daher kann sie heute in nahezu allen technischen Bereichen zur Analyse relevanter Systemgrößen herangezogen werden. Darüber hinaus fördern die Fortschritte im Bereich der Computergrafik und der darauf basierenden Softwareentwicklung die Entwicklung anwenderfreundlicher Programme, die insbesondere die Visualisierung von Ergebnissen und deren Interpretation stark vereinfacht haben. Als Analysetool fügt sich die Finite-Elemente-Analyse optimal in den Prozess der durchgängig virtuellen Produktentwicklung ein – Iterationen in der Entwicklung werden dabei zunehmend automatisiert.

ales Bauteil oder System zu beschreiben, vielmehr können stets verschiedene Modelle abgeleitet werden (Abb. 8). Eine Modellierungsmöglichkeit kann gegenüber einer anderen als überlegen angesehen werden, wenn sie ihren Erstellungszweck besser erfüllt. So hat ein Modell im Vergleich mit einem anderen beispielsweise den Vorzug, dass es das reale Verhalten eines Systems besser abbildet. Geht diese Eigenschaft jedoch mit exorbitanten Kosten für die Berechnungszeit einher, erfüllt die gewählte Idealisierung nicht ihren Zweck. Letztlich geht es immer darum, einen Kompromiss aus Genauigkeit und Berechnungseffizienz zu finden.



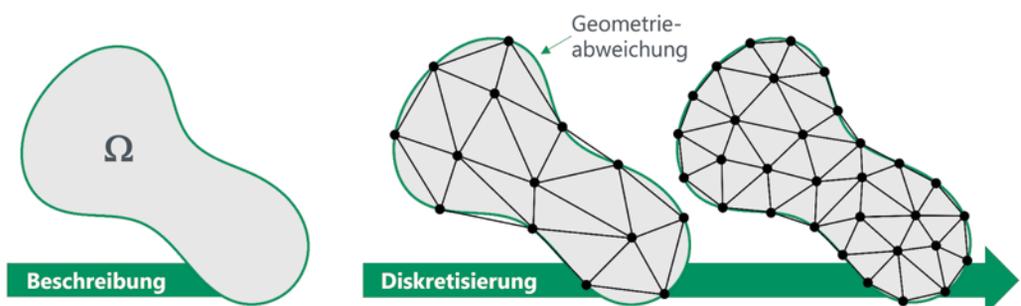
Ungewissheit in der Simulation

So sehr Simulationen zur Reduzierung von Ungewissheit während der Entwicklung technischer Systeme beitragen – durch den Einsatz numerischer Berechnungsmethoden werden auch neue Unsicherheiten in den Entwicklungsprozess eingeführt. Zwangsläufig entstehen numerisch bedingte Rundungs- und Abschneidefehler. Diese Informationsverluste können bereits die Eingabegrößen des Modells verfälschen. Die Idealisierung der Problemstellung in Form einer mathematischen Beschreibung, die am Beginn der Modellierung steht, ist ebenfalls mit einem Verlust an Informationen verknüpft. Es gibt keinen eindeutigen Weg, ein re-

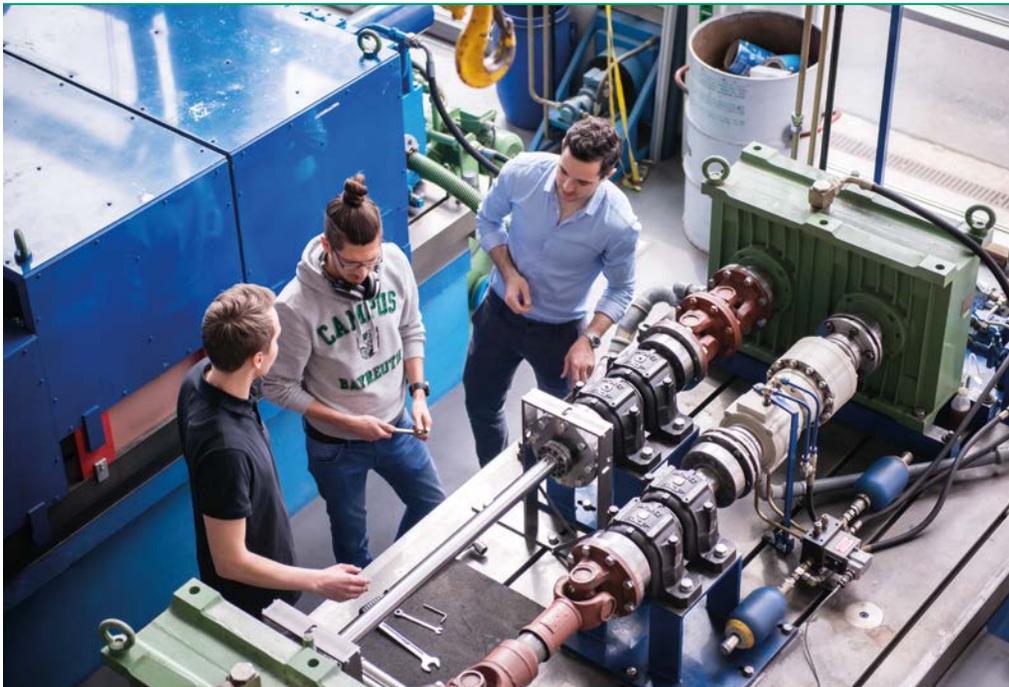
Die Diskretisierung der gewählten mathematischen Beschreibung ist eine weitere Fehlerquelle bei der Modellbildung. Sie ist im Kontext der Finite-Elemente-Analyse besonders bei der Vernetzung, der Unterteilung des Bauteils in Elemente, relevant

LITERATURTIPP

F. Rieg, R. Hackenschmidt, B. Alber-Laukant: Finite Elemente Analyse für Ingenieure – Grundlagen und praktische Anwendungen mit Z88Aurora. 6. Aufl. München 2019.



■ Abb. 10: Diskretisierung eines Gebiets (links) am Beispiel einer Triangulation. Für eine möglichst genaue Abbildung der Geometrie muss eine ausreichend feine Netzgröße gewählt werden (Grafik: Aljoscha Zahn).



■ Abb. 11: Versuchshalle am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD der Universität Bayreuth. Ein Mitarbeiter und studentische Hilfskräfte bereiten hier einen Verspannungsprüfstand für einen Überlastversuch an einer Kupplung vor (Foto: LS für Konstruktionslehre und CAD).

(Abb. 10). Hierbei müssen die Elementgrößen ausreichend „fein“ gewählt werden, um eine repräsentative Abbildung der Geometrie zu erhalten. Dies lässt sich durch Konvergenzanalysen oder adaptive Methoden sicherstellen. Die größte Unsicherheit geht aber weiterhin vom Menschen selbst aus. Moderne Anwendungen vereinfachen den Simulationsprozess zusehends und bereiten die Ergebnisse in anschaulichen Grafiken auf. Allzu leicht wird jedoch vermeintlich richtigen Resultaten falsches Vertrauen geschenkt. Dem Berechnungsingenieur obliegt daher die Verantwortung, die Unsicherheiten des gewählten Berechnungsverfahrens zu identifizieren und die daraus möglicherweise resultierenden Fehler abzuschätzen. Dann gilt es, diesen Fehlern durch geeignete Maßnahmen vorzubeugen.⁶ Hierfür sind Expertise und Erfahrung in dem jeweiligen Problemfeld zwingend erforderlich.

Jede Simulation bedarf einer Validierung

Moderne Anwendungen für die Produktauslegung ermöglichen prinzipiell einen vollständig virtuellen Entwicklungsprozess. Nach wie vor aber müssen die verwendeten mathematischen Modelle den Praxistest bestehen: Eine Validierung anhand vorgeschriebener Bewertungskriterien und eine Prüfung des realen Produktverhaltens sind unabdingbar (Abb. 11). Insbesondere der Einsatz additiver Fertigungstechnologien kann dazu beitragen, die

Kosten für die Modell- und Prototypenfertigung immer weiter zu senken. Neben der Prüfung der Belastungsgrenzen und der Analyse der Lebensdauer von Bauteilen und Baugruppen eröffnen Schlüsseltechnologien der Industrie 4.0 gänzlich neue Potentiale für die Instandhaltung technischer Systeme.⁷ Aktuell wird beispielsweise an Maschinenelementen geforscht, in die Sensoren integriert sind. Diese generieren Messdaten, die in Echtzeit ausgewertet werden, um kritische Beanspruchungen oder nachlassende Betriebseigenschaften zu identifizieren. Außerplanmäßige Ausfälle können so aktiv vermieden werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Infolge des steten methodischen und technologischen Fortschritts kann die Ungewissheit in Entwicklungsprozessen durch Berechnung und Simulation immer zuverlässiger eliminiert werden – vorausgesetzt, diese komplexen und anspruchsvollen Verfahren werden von bestens ausgebildeten und erfahrenen Fachleuten angewendet.

AUTOREN



Aljoscha Zahn M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth.



Tobias Baumann M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth.

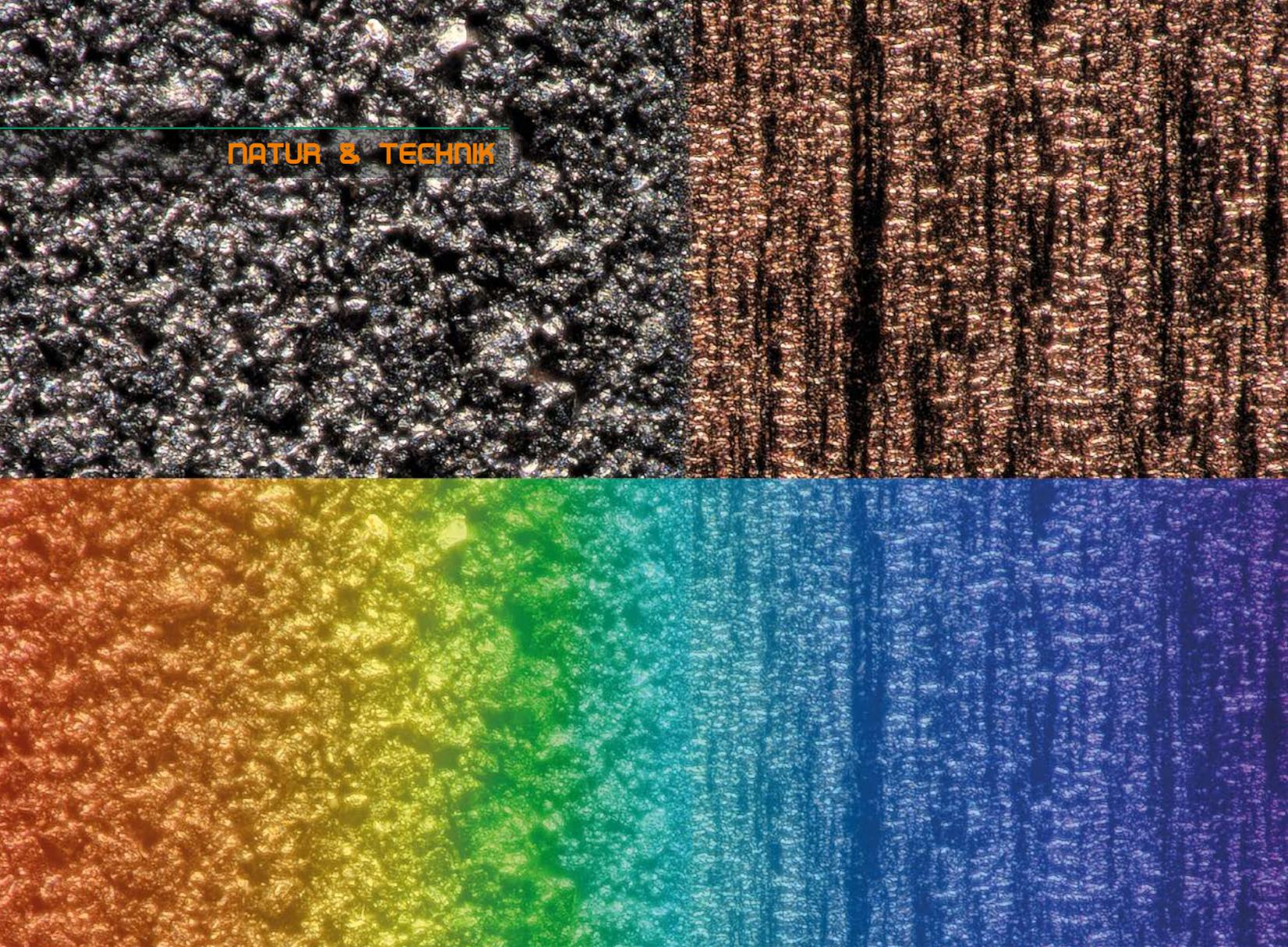


Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel ist Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth.



Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg ist ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD an der Universität Bayreuth.

- 1 Industriemagazin: Fünf Jahre nach Brückeneinsturz in Frohnleiten: Prozess in Graz beginnt. <https://industriemagazin.at/a/fuenf-jahre-nach-brueckeneinsturz-in-frohnleiten-prozess-in-graz-beginnt>, Abgerufen am 11.06.2021.
- 2 J. M. Smith: Quality Management in Engineering Simulation; A Primer for NAFEMS QSS. Glasgow 2014.
- 3 VDI 2221 Blatt 1:2018-03 Entwicklung technischer Produkte und Systeme; Modell der Produktentwicklung. Berlin 2018.
- 4 K. Ehrlenspiel, A. Kiewert, A. U. Lindemann, A. Mörtl: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren; Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 8. Aufl. Wiesbaden 2020.
- 5 F. Rieg, R. Hackenschmidt, B. Alber-Laukant (2019), siehe Literaturtipp.
- 6 Vgl. Anm. 2.
- 7 J. Reichel, G. Müller, J. Haeffs (eds.): Betriebliche Instandhaltung. Heidelberg 2018.



■ Fridolin Röder

Unsicherheiten in Batteriesystemen

Von den Materialien über die Herstellung bis zum Betrieb

■ Links oben: Mikroskopische Aufnahme einer Batterielektrode, die auf einen Stromableiter aus Kupfer beschichtet wurde. Rechts oben: die Kupfermetallfolie. Der untere farbige Abschnitt zeigt die Höhe der Beschichtung an: Rote Bereiche liegen höher, blaue Bereiche liegen tiefer (Bild: Fridolin Röder).

Batterietechnologien nehmen eine Schlüsselrolle für die Energiewende und die Elektromobilität ein. Elektrifizierte Fahrzeuge sind längst kein Nischenprodukt mehr, Batterieelektroden und -zellen werden hierfür im großen Maßstab in „Gigafactories“ hergestellt. Die Anforderungen an den Preis und die Qualität der Batterien steigen dabei stetig an. Da die Produktion sehr viel Energie benötigt, ist für die Nachhaltigkeit der elektrifizierten Fahrzeuge eine möglichst lange Nutzungsdauer der Batterien wichtig. Hierzu zählt auch eine mögliche zweite Nutzungsphase, beispielsweise als Speicher von Energie, die von Photovoltaikanlagen in Haushalten erzeugt wird. Die Lebensdauer einer Batterie zu bestimmen und – damit einhergehend – ihre Nachhaltigkeit zu beurteilen, ist schwierig und mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Weitere Unsicherheiten im Kontext von Batterien sind unter anderem eine schwankende Produktqualität sowie ungleichmäßige abnutzungsbedingte Veränderungen, die unentdeckt bleiben.

In mobilen und portablen Anwendungen, zum Beispiel in elektrischen Fahrzeugen und Mobiltelefonen, werden heute in der Regel Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Bei diesem Batterietyp werden Lithiumionen in den positiven und negativen Elektroden eingelagert. Die Elektroden sind aus porösen Schichten aufgebaut, die aus festen, meist kugelförmigen Partikeln bestehen. Bei einer geladenen Batteriezelle befindet sich das Lithium hauptsächlich in der negativen Elektrode. Während des Entladens müssen sich die Lithiumionen von der negativen zur positiven Elektrode bewegen. Für diesen Transportprozess nutzen die Lithiumionen den flüssigen Elektrolyten, welcher die Lücken zwischen den festen Bestandteilen in der Batterie ausfüllt. Der Transport durch den Elektrolyten stellt einen unerwünschten Widerstand dar, der die Leistung der Batteriezelle verringert. Je kürzer die zu überwindende Distanz ist und je zahlreicher und breiter die Transportwege sind, desto mehr verringert sich der Widerstand. Gleichzeitig gilt: Je dichter die Partikel sind, desto größer ist der Widerstand für den Transport der Lithiumionen und die dadurch bedingte Leistungsminderung. Allerdings können gerade bei einer hohen Partikeldichte eine große Zahl von Lithiumionen in der Elektrode gespeichert werden, so dass die Speicherdichte der Batterie entsprechend

„Eine detaillierte statistische Analyse ermöglicht eine bessere Einschätzung von Unsicherheit.“

Unsicherheit

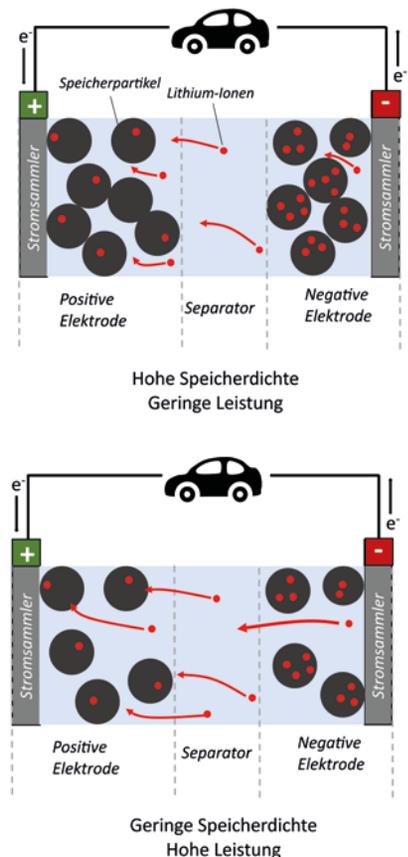
Der Begriff „Unsicherheit“ beschreibt im technischen Kontext das Fehlen von Gewissheit bezüglich einer physikalischen Größe oder Eigenschaft. Diese Ungewissheit kann aus fehlenden oder fehlerbehafteten Informationen resultieren. In jedem Fall kann sie erhebliche Auswirkungen auf die Nutzung technischer Systeme haben.

steigt (Abb. 1). Ein optimales Elektrodendesign ist also immer ein Kompromiss zwischen Speicherdichte und Leistung.

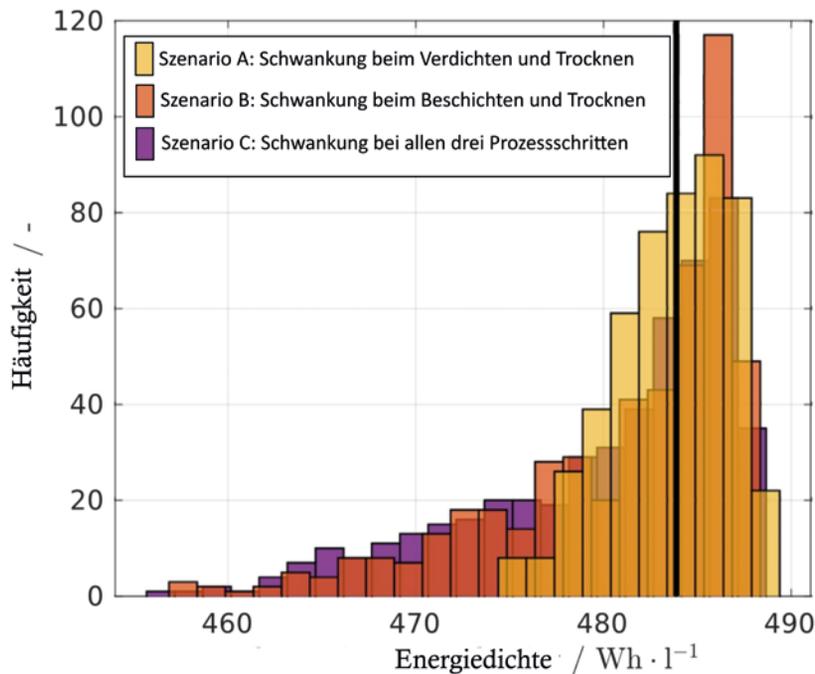
Selbst wenn Batteriezellen die gleiche Spezifikation aufweisen und in den gleichen Produktionsanlagen hergestellt wurden, können sich ihre Elektroden unterscheiden. Die daraus resultierenden Unterschiede zwischen den Batteriezellen wirken sich beispielsweise auf lokale Strompfade, die Energiedichte, die Lebensdauer und die Sicherheit der Batteriezellen aus. Große Batteriesysteme, wie sie unter anderem in elektrischen Fahrzeugen eingesetzt werden, bestehen aus 100 bis 200 Einzelzellen. Die Batteriezellen im System sind alle ein wenig unterschiedlich, wobei die schwächste Zelle häufig die Leistung und Kapazität des Batteriesystems begrenzt. Sie kann sogar den Ausfall eines kompletten Batteriestrangs verursachen.

Die Unterschiede zwischen den Batteriezellen können sich während der Nutzung weiter verstärken. In diesem Fall kommt es möglicherweise zu einer Verringerung ihrer Lebensdauer und zu sicherheitskritischen Fehlern des Batteriesystems. Um diese Risiken so weit wie möglich zu verringern, müssen die Unterschiede zwischen den Batteriezellen schon beim Entwurf des Systems gut verstanden und möglichst präzise eingeschätzt werden. So kann man ihnen im Betrieb durch ein geeignetes Batteriemangement begegnen und sie dadurch verringern. Auf dieser Grundlage ist es dann auch möglich, eine lange Lebensdauer der Zellen und eine hohe Sicherheit des Systems zu gewährleisten.

■ Abb. 1: Der Einfluss der Elektrodenporosität auf die Speicherdichte und Leistung der Batterie (Grafik: Fridolin Röder).

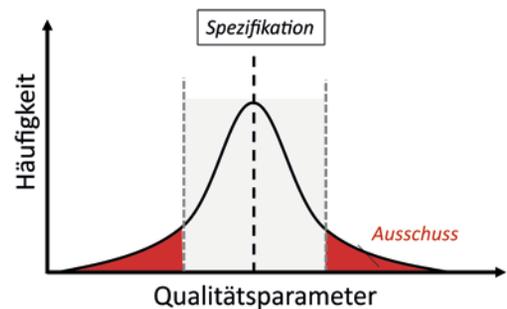


Elektrodenherstellung



■ Abb. 2: Simulationsstudie zu Schwankungen in der Elektrodenproduktion und ihrem Einfluss auf die Energiedichte der Batteriezellen. Die Grafik stellt die Ergebnisse einer statistischen Auswertung dar und zeigt die Qualität virtuell produzierter Batteriezellen für drei verschiedene Produktionsszenarien. Die Energiedichte fungiert dabei als Qualitätskriterium. Man kann erkennen, dass Schwankungen beim Trocknen und Verdichten im Szenario A eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Energiedichte haben. Hingegen wirken sich die Schwankungen bei der Beschichtung in den Szenarien B und C erheblich auf die Energiedichte aus. Folglich sollten beim Prozessschritt der Beschichtung die Schwankungen verringert werden, damit die geforderte Produktqualität in möglichst wenigen Fällen unterschritten und der Ausschuss minimiert wird (Grafik nach O. Schmidt et al., 2020).¹

■ Abb. 3 (rechts): Spezifikation und Ausschuss bei Schwankungen in der Produktqualität (Grafik: Fridolin Röder).



Herstellung von Batterieelektroden

Batterieelektroden mit spezifizierten Eigenschaften werden in einer langen Kette von Einzelschritten hergestellt. Wesentliche Prozessschritte sind die Auftragung der porösen Elektrodenbeschichtung auf den Stromsammelr sowie die Trocknung und die Verdichtung der Elektroden (Abb. 2). Bei jedem dieser Einzelschritte kommt es zu maschinenbedingten Schwankungen, zudem gibt es unvermeidliche kleinere Unterschiede bei den eingesetzten Ausgangsmaterialien. Daraus ergeben sich schwankende Eigenschaften der Elektroden, insbesondere die Porosität und die Dicke ihrer Beschichtungen sind nicht immer gleich.¹ Infolgedessen ist eine gleichbleibende Qualität der Batteriezellen nicht gewähr-

leistet. Sind die Abweichungen groß, kann es vorkommen, dass ein Teil der hergestellten Batterien den zu erfüllenden Qualitätskriterien nicht gerecht wird und als Ausschuss nicht zur Wertschöpfung beiträgt (Abb. 3).

Die Ursachen für die Unsicherheiten, die sich bei der Elektrodenherstellung ergeben, sind vielfältig und beeinflussen sich häufig gegenseitig, so dass eine isolierte Betrachtung schwierig ist. Computersimulationen können eingesetzt werden, um den Herstellungsprozess und den Einfluss von Elektroden-eigenschaften zu untersuchen.² Hierfür werden mathematische Modelle für die einzelnen Produktionsschritte und die herzustellende Batteriezelle benötigt. Solche Modelle bilden bekannte Ursache-Wirkung-Zusammenhänge in den Produktionsschritten und ebenso die Prozesse in der fertigen Batterie mittels mathematischer Gleichungen ab. Computersimulationen haben den Vorteil, dass verschiedene Einflussfaktoren auch isoliert betrachtet und untersucht werden können, was in einer realen Anlage so nicht möglich ist. Das Modell kann auch für eine statistische Analyse verwendet werden, die zeigt, wie sich Schwankungen in den Produktionsschritten auf die Unsicherheit der Batteriezelle auswirken (Abb. 2).

Betrieb von Batteriesystemen

Beim Betrieb von Batteriesystemen können sich die dargestellten Schwankungen infolge der Alterung einzelner Batteriezellen verstärken. Wenn Batteriezellen sich hinsichtlich ihrer Kapazität unterscheiden und in einem Batteriesystem in Reihe verschaltet werden, können sich unterschiedliche Ladungszustände ergeben (Abb. 4). Dabei begrenzt die Zelle mit der kleinsten Kapazität die Gesamtkapazität des Batteriesystems und damit die Reichweite des elektrischen Fahrzeugs.

AUTOR

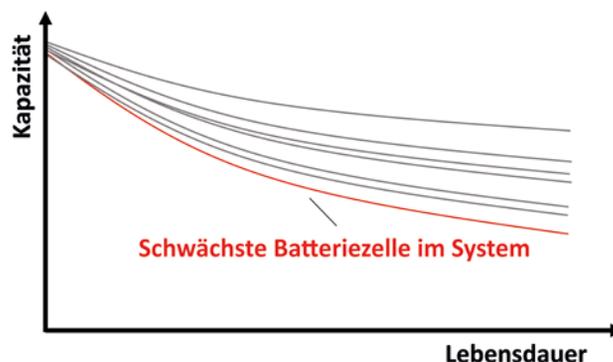
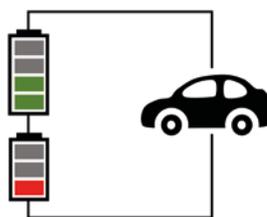
Prof. Dr.-Ing. Fridolin Röder ist Juniorprofessor für Methoden des Batteriemaneagements an der Universität Bayreuth.



Diese Unterschiede müssen durch das Batterie-Management-System kompensiert werden, beispielsweise durch Maßnahmen zum Ladungsausgleich. Damit das System hierzu in der Lage ist, sind entsprechende Schaltungen, elektrische Komponenten und Regler nötig. Diese gehen allerdings mit zusätzlichen Kosten und einer Verringerung der Energiedichte des gesamten Batteriesystems einher. Bei der Auslegung von Batteriesystemen, Batterie-Management-Systemen und Betriebsstrategien ist es daher wichtig genau zu wissen, wie sich die Zellen voneinander unterscheiden und wie sich ihre Unterschiede während der Nutzung ändern. Typischerweise vergrößern sich die Unterschiede im Laufe der Nutzung. Daher ist es erforderlich, die Unterschiede über die gesamte Nutzungsphase durch stochastische Analysen zu bestimmen.

Die unterschiedlich starke Abnutzung der Batteriezellen im laufenden Betrieb ist häufig auch auf die anfänglichen Unterschiede der Elektroden Eigenschaften zurückzuführen. Wenn Batterieelektroden beispielsweise einen vergleichsweise hohen Anteil an großen Partikeln aufweisen, können sie unerwünschte Prozesse auslösen, wie etwa die Abscheidung von metallischem Lithium (Abb. 5). Derartige Nebenwirkungen lassen sich anhand von Batteriemodellen, welche die Partikelgröße als Parameter mit statistisch verteilten Eigenschaften berücksichtigen, genauer untersuchen.³ Entsprechende Computersimulationen haben gezeigt, dass die Stromdichten an den Oberflächen großer Partikel deutlich höher sind, was die Abnutzung der Batterieelektroden beschleunigen kann. Batterieelektroden sollten also eine möglichst einheitliche Partikelgröße aufweisen, um eine ungleichmäßige Alterung im Betrieb zu vermeiden.

Ungleiche Kapazität von Batterien in Reihenschaltung



Fazit

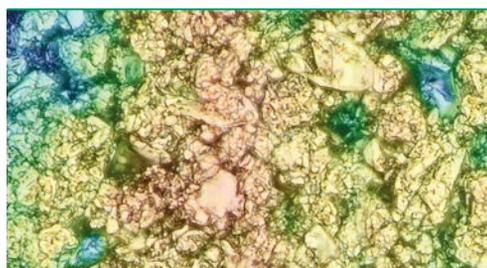
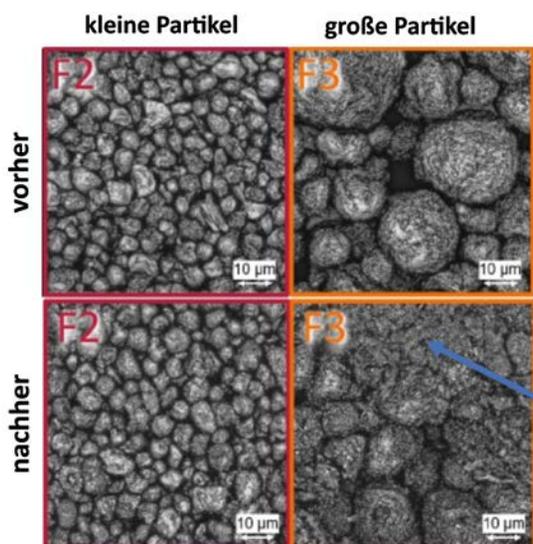
Unsicherheiten in Batterien können auf den verschiedensten Ebenen – von den Produktionsanlagen bis hin zu Alterungsprozessen an den Partikeloberflächen – auftreten. Computersimulationen helfen, ihre Ursachen zu verstehen. Auf der Basis geeigneter Modelle ist es möglich, die aus dem Herstellungsprozess und dem laufenden Betrieb resultierenden Unterschiede vorherzusagen und gezielt zu verringern. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass eine detaillierte statistische Analyse eine bessere Einschätzung von Unsicherheit ermöglicht. Zwar lassen sich die Unterschiede hierdurch nicht verringern, doch können beim Systementwurf und Betrieb Maßnahmen ergriffen werden, die einen angemessenen Umgang mit diesen Quellen von Unsicherheit ermöglichen. Die Kombination von Modellbildung, Simulation und statistischer Analyse ist daher eine vielversprechende Herangehensweise bei der Entwicklung neuer Batteriesysteme: Sie fördert die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Technologien im Bereich der Elektromobilität.

■ Abb. 4: Unterschiede in der Kapazität bei verschalteten Batteriezellen (Grafik: Fridolin Röder).

LITERATURTIPPS

O. Schmidt et al.: Modeling the Impact of Manufacturing Uncertainties on Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society* (2020), Vol. 167, No. 6. DOI: 10.1149/1945-7111/ab798a.

F. Röder et al.: Simulating the Impact of Particle Size Distribution on the Performance of Graphite Electrodes in Lithium-Ion Batteries. *Energy Technology* (2016), Vol. 4, 1588-1597. DOI: 10.1002/ente.201600232.



■ Abb. 5 (links): Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen die Elektrode vor und nach der Nutzung. Bei kleinen Partikeln (links) ist keine Veränderung durch die Nutzung zu erkennen. Dagegen sind bei Elektroden mit großen Partikeln (rechts) deutlich Lithium-Abscheidungen zu sehen (Bild: Fridolin Röder. Mikroskopische Aufnahmen auch verwendet in L. Bläubaum et al., 2020)³.

■ Abb. 6 (rechts): Die mikroskopische Aufnahme lässt erkennen, wie sich die Partikel in der beschichteten Batterieelektrode verteilen. Die Farbe zeigt auch hier wieder die Höhe an: Rote Bereiche liegen höher, blaue Bereiche tiefer (Bild: Fridolin Röder).

- 1 Oke Schmidt et al. (2020), siehe Literaturtipps.
- 2 V. Laue et al.: Model-Based Uncertainty Quantification for the Product Properties of Lithium-Ion Batteries. *Energy Technology* (2020), Vol. 8, 1900201. DOI: 10.1002/ente.201900201.
- 3 L. Bläubaum et al.: Impact of Particle Size Distribution on Performance of Lithium-Ion Batteries. *ChemElectroChem* (2020), Vol. 7, 4755-4766. DOI: 10.1002/celc.202001249. – F. Röder (2016), siehe Literaturtipps.



WISSEN & ENTSCHEIDEN

■ Mirco Schönfeld

Mehr Daten, weniger Ungewissheit?

Datenmodelle als Schlüssel zum Wissensgewinn

■ Große Datenmengen allein reichen nicht aus, um Gewissheit zu erzielen. Entscheidend ist die Modellierung der Daten, die auf gelingende zwischenmenschliche Kommunikationsprozesse angewiesen ist (Foto: ist).

„Daten sind der wichtigste Rohstoff unseres Jahrhunderts.“ – „Die Welt ist ein einziges Big Data-Problem.“ – „Ohne Big Data steht deine Firma da wie ein blinder, tauber Hirsch auf der Autobahn.“ So und ähnlich lauten die Slogans derjenigen, die die unumstößliche Notwendigkeit von Datenanalysen propagieren. Damit vermitteln sie den Eindruck, Datenanalysen würden ihrerseits unumstößliche Gewissheiten produzieren und gleichsam eine tiefere Wahrheit aus Daten freilegen. Es wird der Eindruck erweckt, Erkenntnisgewinn sei nur eine Sache der richtigen Algorithmen und Statistiken. Aber ist das wirklich so? In diesem Beitrag soll es um die Frage gehen, wie Wissen aus Daten gewonnen werden kann. Wir werfen einen Blick auf die Entstehung von Daten und auf den Kontext, in dem dies geschieht. Wir sehen, wie aus Daten Modelle werden und warum bewusste Datenmodellierung ein notwendiger Prozess ist. Das lässt uns schließlich erahnen, wie aus Daten nützliches Wissen gewonnen werden kann.

Wo werden Daten gesammelt?

Zuerst denken wir sicherlich an das Internet. Während wir das Internet nutzen, produzieren wir Daten: wenn wir etwas bei Social Media posten, uns auf einem Web-Portal einloggen, um beispielsweise unsere E-Mails zu bearbeiten, oder wenn wir in einem Online-Shop einkaufen. Wir produzieren Daten aber auch unbemerkt, beim einfachen Surfen auf Webseiten. Für Datensammlungen dieser Art sind Tracker zuständig. Tracker bestehen aus Programm-Code, der beim Besuch einer Webseite in unserem Browser im Hintergrund ausgeführt wird. Tracker erheben Nutzungsdaten und Statistiken: Aus welchen Weltregionen kommen die Besucher*innen der Webseite, zu welchen Tageszeiten kommen sie und auf welche Überschriften klicken sie am häufigsten? Für die Zuständigen einer Webseite sind das wertvolle Informationen. Doch auch außerhalb des Internets und ohne Computer hinterlassen wir Spuren, die als Daten irgendwo gespeichert werden. Jede EC- oder Kreditkartentransaktion, jede SMS, jeder Anruf erzeugt ein „Datum“. Es gibt sogar Mülleimer, die Daten erheben.¹

Warum werden überhaupt Daten gesammelt?

Seitdem die neue Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) in Kraft getreten ist, sollte diese Frage leicht zu beantworten sein. Die DSGVO definiert nämlich

das Prinzip der Datensparsamkeit, welches das unbeschränkte Datensammeln verbietet: Daten dürfen nur zu einem bestimmten Zweck gesammelt werden. Seitdem müssen die Datenschutzrichtlinien der Webseite, der Hausbank oder des Car-Sharing-Service transparent darlegen, welche Daten erhoben werden und zu welchem Zweck. In diesen Richtlinien wird häufig erklärt, dass Daten helfen sollen, technische Defekte zu identifizieren. Oft sollen mit Hilfe von Daten auch Produkte oder Services verbessert werden. Dahinter verbirgt sich dann beispielsweise die Intention, Personalisierungs- oder Empfehlungssysteme zu entwickeln, zu trainieren und zu optimieren. Unter ähnlichen Formulierungen werden Daten aber auch erhoben, um neue Geschäftsmodelle und -felder zu identifizieren und die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit von Firmen zu sichern.

Gemeinhin werden Daten gesammelt, um Ungewissheiten zu minimieren – seien es technische, wirtschaftliche oder organisatorische. Aus Daten sollen neue Erkenntnisse gewonnen oder Vorhersagen für die Zukunft getroffen werden. Aber ist das so einfach?

Big Data – und alles wird gut?

Mit dem Schlagwort „Big Data“ wird oft das Versprechen verbunden, dass mehr Daten automatisch mehr Wissen und Gewissheit bedeuten. Wenn die Datenmenge nur groß genug sei, fänden sich darin

AUTOR



Prof. Dr. Mirco Schönfeld ist Juniorprofessor für Datenmodellierung und Interdisziplinäre Wissensgenerierung an der Universität Bayreuth.

Tracker als Schlüssel zum Wissensgewinn – über uns als Webseiten-Besucher*innen

Eine der Hauptfunktionen von Trackern besteht darin, dass wir von verschiedenen Internetseiten wiedererkannt werden. Dies geschieht durch sogenanntes Browser-Fingerprinting. Programm-Code, der auf Webseiten ausgeführt wird, hat über unseren Web-Browser Zugriff auf bestimmte Eigenschaften unseres Computers und auf Einstellungen, die wir auf unserem Computer vorgenommen haben. Das ist keine Sicherheitslücke, sondern notwendig, damit eine Webseite ihre Darstellung optimal an das Endgerät anpassen kann.

Die Mischung aus Browser, Betriebssystem und Bildschirmgröße grenzt den Kreis der bekann-

ten Personen oft schon sehr gut ein. Schließlich muss die Tracking-Software nicht alle Personen der Welt identifizieren, sondern nur die ihr Bekannten zuverlässig wiedererkennen. Meist stechen einzelne Personen eindeutig aus der Masse heraus, wenn die Liste der auf dem Betriebssystem installierten Schriftarten hinzugezogen wird: Wie wahrscheinlich ist es schließlich, dass auf der anderen Seite der Welt jemand drei ausgewählte Schriftarten der Corporate Identity der Universität Bayreuth installiert hat? Wie eindeutig sich jede*r Einzelne von der Masse der Webseiten-Besucher unterscheidet, lässt sich hier nachvollziehen:

<https://amiunique.org/>

alle Phänomene, die wir unseren Algorithmen beibringen müssen. Maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz brauchen schließlich viele und vielfältige Daten zum Trainieren. In Wahrheit aber werden die Ungewissheiten mit Big Data nicht automatisch kleiner. Sollen beispielsweise Erkenntnisse über Menschen und menschliches Verhalten gewonnen werden, ist es eine wichtige Frage, ob gesammelte Daten überhaupt menschliches Verhalten abbilden. In analoger Weise ist diese Frage für alle Bereiche datenbasierten Erkenntnisgewinns relevant – sei es für unternehmensinterne Marktforschung und Forschung zur Produktverbesserung, sei es für wissenschaftliche Forschung.

„Ein Datenmodell repräsentiert die reale Welt, wie sie sich im weiteren Analyseprozess darstellt.“

Aber warum kann hinsichtlich der Aussagekraft der Daten überhaupt Ungewissheit bestehen? Werfen wir einen Blick auf Daten aus Social Media Plattformen. Social Media gelten als eine gigantische Datenquelle, über die Individuen und Gesellschaften mit ihren individuellen Ansichten und ihrem kollektiven Verhalten vom Schreibtisch aus beobachtet werden können. Das, was wir beobachten, und die Daten, die wir sammeln können, enthalten aber nur selten ein getreues Abbild menschlichen Verhaltens. Denn die Mechanismen, die unsere Aufmerksamkeit steuern oder unser Sozialleben prägen, sind auch denjenigen bekannt, die die Social Media-Plattformen entwerfen und entwickeln. Diese Mechanismen werden geschickt angeregt oder subtil aktiviert, um die Akzeptanz einer Plattform zu steigern und die individuelle Verweildauer auf der Plattform zu erhöhen – und nicht, um möglichst aussagekräftige Daten über Individuen und Gesellschaften zu generieren.

Unseren Daten müssen wir deshalb stets kritisch gegenüber stehen. Wir müssen hinterfragen, ob sie wirklich menschliches Verhalten beschreiben oder nur Reaktionen auf die dargebotenen Reize einer Webseite oder Social Media Plattform widerspiegeln. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom Plattformeffekt.² Neben dem Plattformeffekt lauern zahlreiche weitere Fallstricke, die einen kritischen Blick auf die vorhandenen Daten und den Kontext, in dem sie erhoben wurden, unabdingbar machen. Hierzu zählen beispielsweise nicht-menschliche Datenerzeuger (Bots), Verzerrungen hinsichtlich der Repräsentation gesellschaftlicher Gruppen, un-

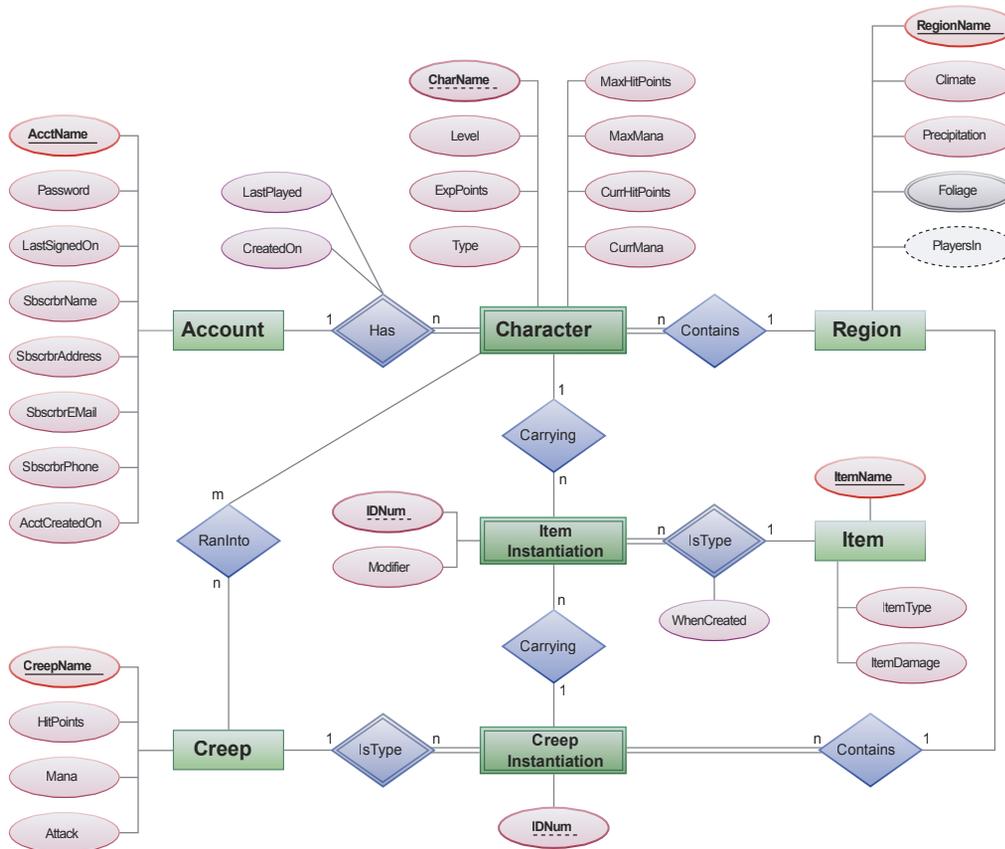
terschiedliche Normen und Wertvorstellungen der Nutzer*innen und vieles mehr.³

Allzu oft ist es vor allem der Kontext oder der Zweck von Datensätzen, der nicht ausreichend berücksichtigt wird. Das ist insbesondere bei Daten der Fall, die nicht oder nicht ausschließlich dort verwendet werden, wo sie erzeugt werden. Diese Daten treten eine *data journey*, eine Datenreise, an: In deren Verlauf werden sie an verschiedenen Stationen bereinigt, vereinheitlicht, rekonfiguriert, zu anderen Datensätzen verlinkt oder aggregiert. Diese Operationen steigern die Wiederverwendbarkeit von Datensätzen oder ermöglichen es, aus ihrer Weitergabe finanzielle Gewinne zu ziehen. Die einzelnen Stationen können aber jeweils unterschiedlichen politischen Interessen oder soziokulturellen Wertvorstellungen unterliegen, die unterschiedliche Formen des Umgangs mit Daten rechtfertigen. In dem, was eine Station weitergibt, sind Kontext und Zweck ihrer Eingabedaten nicht mehr erkennbar.⁴ Eine große Datenmenge allein hilft also nicht, um Gewissheiten zu schaffen. Entscheidend sind vielmehr der Kontext der Datenerhebung und die diffizilen Mechanismen, die damit in Verbindung stehen. Wie kommen wir aber nun zu dem Wissen, das in unseren Daten schlummern soll?

Von Daten zum Wissen: ein weiter Weg

Dem Wissensgewinn aus Daten kommen Kenntnisse der Statistik, Algorithmik und Programmierung natürlich sehr zugute. In Szenarien, in denen mehrere Parteien am Ergebnis einer Datenanalyse interessiert sind, sind die Algorithmen oft nicht das Wichtigste. Solche Szenarien finden sich in Wissenschaft und Wirtschaft gleichermaßen – beispielsweise wenn die Parteien aus unterschiedlichen wissenschaftlichen Fachdisziplinen oder aus unterschiedlichen Abteilungen eines Unternehmens stammen. In allen diesen Fällen gilt: Die zentralen Herausforderungen bei datengetriebenen Erkenntnis- oder Entscheidungsprozessen bestehen auf der zwischenmenschlichen Ebene. Genau hier setzt die Datenmodellierung an. Datenmodellierung ist mehr als nur die Auswahl von Zahlen und Zeichen für Datensätze. Den Kern der Modellierung bilden kommunikative Aushandlungsprozesse. Diese betreffen

- die Bedeutung der Daten,
- die motivierende Fragestellung,
- die Operationalisierung dieser Fragestellung,
- und die notwendigen Bestandteile der erkenntnisfördernden Prozesskette.



■ Abb. 1: Graphische Darstellung eines Entity-Relationship-Modells, wie es für den Aufbau einer Datenbank häufig verwendet wird. Es stellt Objekte und deren Beziehungen in einem definierten Ausschnitt der realen Welt dar (Grafik: Jorrit nl / wikimedia commons).

Die Modellierung der Daten beginnt bei der Auswahl der zu beobachtenden Phänomene und der Entscheidung, wie sie als Daten repräsentiert werden sollen. Werden Informationen zusammengefasst und kategoriale Platzhalter gespeichert? Werden alle Eigenschaften eines Phänomens gespeichert, oder werden bestimmte Details ausgeblendet? Werden Ausreißer abseits einer Norm erfasst? Oftmals werden diese Fragen implizit beantwortet, ohne dass man sich der Tatsache bewusst ist, dass es sich bei der Datenmodellierung um einen sehr komplexen Vorgang handelt. Dabei stecken in den impliziten Antworten bereits zentrale Modellierungsentscheidungen, durch die sich ein Datenmodell konstituiert. Ein Datenmodell erfüllt alle grundlegenden Eigenschaften von Modellen:⁵

- Modelle sind stets Modelle von etwas, also Abbilder von Originalen.
- Modelle enthalten in der Regel nur diejenigen Eigenschaften eines Originals, die bei der Modellbildung als relevant erscheinen.
- Modelle dienen unter definierten Bedingungen als Platzhalter eines Originals.

Ein Datenmodell hat aber noch eine weitere wichtige Eigenschaft: Es repräsentiert die reale Welt, wie sie sich im weiteren Analyseprozess darstellt. Damit

nimmt es gleich zu Beginn eine tückische Doppelrolle ein. Es fungiert plötzlich nicht mehr nur als Abbild eines Originals, sondern auch als Vorbild für etwas Neues – gewissermaßen für eine neue Realität, die nach der Datenanalyse kommt. Tückisch ist diese Doppelrolle deshalb, weil Modellierungsentscheidungen zu Beginn der Prozesskette, etwa beim Beobachten und Dokumentieren der realen Welt, erheblichen Einfluss auf das Ende der Kette und damit auf die erreichbare Qualität der Datenanalyse haben. So werden aufgrund von impliziten, unbewussten Entscheidungen, die am Beginn der Datenmodellierung getroffen werden, möglicherweise Potenziale verschenkt, die bei der späteren Analyse der Daten dem Erkenntnis- und Wissensgewinn zugute kommen können.

Die zahlreichen Modellierungsentscheidungen in einem zielführenden Miteinander auszuhandeln, ist komplex und herausfordernd. Erforderlich ist dabei die Bereitschaft aller Mitwirkenden, sich auf die Gedankenkonstrukte der Modellierung und die dadurch gesteuerte analytische Auswertung der Daten einzulassen. Denn nur wenn alle Mitwirkenden ein klares Verständnis dessen haben, was das Datenmodell repräsentiert und was es nicht repräsentiert, nur wenn alle Teile der Prozesskette aufeinander abgestimmt sind, kann aus Daten Wissen gewonnen werden, von dem alle profitieren.

1 Einige Mülleimer sammeln Daten über ihren Füllstand und rufen die örtlichen Entsorgungsbetriebe, wenn eine Leerung nötig wird: <https://invidis.de/2018/11/signage-sunday-digitalisierung-fuer-die-tonne-iot-und-intelligente-muelleimer/>. Andere Exemplare erfassen, wer welche Müllbeutel entsorgt mit Hilfe von Gesichtserkennung und QR-Codes auf Abfallbeuteln. Später wird überprüft, ob Abfall korrekt getrennt wurde: <http://www.ecns.cn/news/society/2019-07-12/detail-ifzkzyey4242240.shtml>.

2 D. Ruths, J. Pfeffer: Social Media for Large Studies of Behavior. *Science* (2014), 346 (6213), 1063-4. DOI: 10.1126/science.346.6213.1063.

3 Ebd.

4 J. Bates, Y.-W. Lin, P. Goodale: Data Journeys: Capturing the Socio-Material Constitution of Data Objects and Flows. *Big Data & Society* (2016), 3 (2), DOI: 10.1177/2053951716654502.

5 H. Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie. Wien – New York 1973.

Der Ungewissheit ausgeliefert?

Wie wir bessere statt
schlechtere Entscheidungen
treffen können



Ständig müssen wir Entscheidungen treffen. Leider kommt es dabei oft vor, dass wir über entscheidungsrelevante Fakten im Ungewissen sind. Insbesondere wissen wir in vielen Fällen nicht, welche Folgen unsere Handlungen haben werden. In Zeiten einer pandemiebedingten Schließung gastronomischer Betriebe überlegen beispielsweise unsere politisch Verantwortlichen, ob oder wann die Biergärten wieder öffnen dürfen. Diese Entscheidung würde ihnen leichter fallen, wenn es eine einfache Tabelle gäbe, die für jedes mögliche Datum einer Wiedereröffnung deren Folgen aufzeigt und auch eine Reihe weiterer relevanter Informationen enthält. Doch eine solche Tabelle gibt es nicht, und so muss trotz Ungewissheit eine Entscheidung getroffen werden.

Zwei grundsätzliche Fragen treten an diesem Punkt zutage: Wie soll ich als Handelnde in schwierigen, von eigener Ungewissheit geprägten Situationen entscheiden? Und wie bewerte ich die Handlung einer anderen Person, die sich in einer solchen Situation befindet und sich für diese Handlung entscheidet? Stellen wir uns vor, die politisch Verantwortlichen entscheiden sich für eine Wiedereröffnung der Biergärten am 1. Oktober. Aus welchen Gründen ist ihre Entscheidung als gut oder schlecht, als richtig oder falsch zu bewerten? Unter welchen Voraussetzungen haben wir einen Grund für den Vorwurf, dass sie ein zu frühes oder ein zu spätes Öffnungsdatum gewählt haben?

Klar ist, dass die zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen nicht alle gleich gut sind. Deshalb ist es trotz vieler ungewisser, aber entscheidungsrelevanter Faktoren nicht gerechtfertigt, jede beliebige Entscheidung gutzuheißen. Ebenso aber wäre es falsch, mit dem Urteil über eine Entscheidung der politisch Verantwortlichen grundsätzlich abzuwarten und diese erst im zeitlichen Abstand zu loben oder zu kritisieren – je nachdem, welche Folgen in der Zwischenzeit eingetreten sind. Dies wäre einfach, aber ungerecht: Denn unsere Bewertung würde sich dann auf eine Gewissheit berufen, welche die politisch Verantwortlichen zum Zeitpunkt der Entscheidung nicht hatten.

Handlungsoptionen und mögliche Welten

Sowohl dann, wenn wir selbst entscheiden, als auch dann, wenn wir die Entscheidungen anderer bewerten, unterscheiden wir zwei Komponenten jeder Entscheidung, nämlich Tatsachen und Werte:

- Wenn wir von Tatsachen sprechen, geht es darum, wie die Welt funktioniert. Besonders entscheidungsrelevant sind dabei Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, die es uns erlauben, mögliche Folgen unserer verschiedenen Handlungsoptionen zu antizipieren. Leider kennen wir viele dieser Tatsachen nicht, so sehr wir uns dies auch wünschen.
- Werte hingegen kommen in unseren Präferenzen zum Ausdruck, die davon abhängen, wie sehr wir bestimmte Zustände oder Ereignisse für wünschenswert halten.

Wenn wir Entscheidungen zu treffen haben, müssen wir uns daher zunächst bewusst machen, worauf es im Kern dabei ankommt: nämlich trotz der Ungewissheit zahlreicher relevanter Fakten diejenige Handlungsoption zu wählen, die unseren Präferenzen am besten entspricht. Aber wie treffen wir diese Wahl? Ein wunderbares begriffliches Werkzeug, mit dem wir uns diese Herausforderung vor Augen führen können, ist das Konzept der "möglichen Welten". Es ermöglicht uns, Wissen und Unwissenheit in Bezug auf entscheidungsrelevante Tatsachen klar zu identifizieren und unsere Überlegungen daran auszurichten. Unsere Welt ist nur eine von vielen möglichen Welten, und wir können nicht mit Bestimmtheit sagen, in genau welcher dieser möglichen Welten wir leben. Aber unser Wissen erlaubt es uns, von *einigen* dieser möglichen Welten mit Sicherheit zu sagen, dass wir *nicht* in ihnen leben. Diese Welten können wir daher aus unseren Überlegungen ausschließen, wenn wir Entscheidungen zu treffen haben. Einbeziehen sollen wir nur diejenigen Welten, die mit unserem Wissen kompatibel sind und von denen eine unsere tatsächliche Welt sein könnte.

Was dies im konkreten Einzelfall bedeutet, lässt sich wiederum am Beispiel der Entscheidung über die Wiedereröffnung der Biergärten vergegenwärtigen. Die theoretische Möglichkeit, dass eine Öffnung zu einer Invasion von Außerirdischen führt, braucht von vornherein nicht berücksichtigt zu werden. Unser Wissen reicht aus, um darauf zu vertrauen, dass diese Folge nicht eintreten wird. Ähnlich verhält es sich mit den theoretischen Möglichkeiten, dass eine Öffnung das Wetter verbessert, unser Immunsystem stärkt oder die menschliche Psychologie vorteilhaft beeinflusst, beispielsweise unsere Reaktionen auf Isolation, Langweile oder endlose Zoom-Meetings. Bei einer Entscheidung sind also nur diejenigen möglichen Welten zu berücksichtigen, die unserem Wissen entsprechen. Eigentlich wissen wir ziemlich viel über kausale Beziehungen, die bei der Entschei-

AUTORIN



Prof. Dr. Patricia Rich ist Juniorprofessorin für Philosophy of Economics an der Universität Bayreuth.

LITERATURTIPPS

P. Rich: The key to the knowledge norm of action is ambiguity. *Synthese* (2021). DOI: 10.1007/s11229-021-03221-5.

S. Grant, P. Rich, J. Stecher: Bayes and Hurwicz without Bernoulli. *Journal of Economic Theory* (2020). DOI: 10.1016/j.jet.2020.105027.

dung über eine Öffnung relevant sind: Sonne und Luftzirkulation wirken der Verbreitung von Viren entgegen; Geselligkeit und schönes Wetter verbessern das subjektive Wohlbefinden von Menschen und stärken so ihr Immunsystem. Wir wissen andererseits aber auch, dass Alkohol die Immunfunktion schwächt und Viren durch Sozialkontakte verbreitet werden. Und wir wissen einiges über Kapazitäten von Krankenhäusern, die Wirksamkeit von Masken und Impfungen sowie über die ökonomischen Folgen von Lockdowns und verpassten Schulstunden.

Allem in allem gilt: Je mehr wir wissen, desto kleiner ist die Menge möglicher Welten, die wir in unsere Überlegungen bezüglich einer richtigen Entscheidung einbeziehen müssen. Aber auch diese Menge ist noch ziemlich groß. Wir haben zwar eine breite Kenntnis von vielen Ursache-Wirkungs-Beziehungen, doch wir kennen nicht genau die Folgen, die sich aus einer Vernetzung dieser kausalen Beziehungen ergeben. Nicht selten wirken zwei bekannte Mechanismen in entgegengesetzte Richtungen: Geselligkeit stärkt zwar das Wohlbefinden und die Gesundheit, erhöht aber das Risiko von Infektionen; schönes Wetter wiederum verringert dieses Risiko. Wenn wir in solchen Fällen eine Entscheidung zu treffen haben, wissen wir nicht, zu welchen Ergebnissen die Kombination dieser kausalen Beziehungen führen wird – wir wissen es meistens nicht im Detail, in manchen Fällen haben wir aber noch nicht einmal eine grobe Kenntnis.

„In vielen Situationen des Alltags ist unsere Entscheidungslage durchaus gut, sobald wir uns vergegenwärtigt haben, was genau wir zu wissen glauben und wo unsere Unwissenheit beginnt.“

In manchen Fällen gibt es zwar theoretische Modelle, mit denen sich die Ergebnisse von gleichzeitig wirksamen kausalen Beziehungen berechnen lassen. Aber die Hilfestellung, die uns diese Modelle bieten, ist nur begrenzt. Denn wir können nicht mit Gewissheit sagen, ob der tatsächliche Ablauf der Ereignisse dem Modell entsprechen wird. Es bleiben Möglichkeiten, die wir nicht ausschließen können. In diesem Zusammenhang gibt es einen weiteren wichtigen Punkt: Es ist möglich, dass der tatsächliche Ablauf der Ereignisse erheblich von Faktoren beeinflusst wird, deren Existenz uns verborgen ist; und ebensowenig können wir ausschließen, dass wir den Einfluss von Faktoren, die wir kennen und in

unsere Überlegungen einbeziehen, falsch einschätzen. Diese Ungewissheiten sind, wenn wir entscheiden müssen, besonders schwer zu berücksichtigen. Gleichwohl können wir festhalten: In vielen Situationen des Alltags ist unsere Entscheidungslage durchaus gut, sobald wir uns vergegenwärtigt haben, was genau wir zu wissen glauben und wo unsere Unwissenheit beginnt.

Numerische Wahrscheinlichkeiten

Wenn wir Gewissheiten und Ungewissheiten identifiziert und klar voneinander unterschieden haben, vielleicht sogar in einer Liste einander gegenüber gestellt haben, dann können wir zwar die Zahl der möglichen Welten eingrenzen, die wir in unsere Überlegungen im Hinblick auf eine bestmögliche Entscheidung einbeziehen müssen. Aber diese Eingrenzung sagt noch nichts darüber aus, wie plausibel jede dieser Welten ist. An diesem Punkt steht uns ein weiteres Verfahren zur Verfügung: Die möglichen Welten lassen sich unter dem Aspekt ihrer Plausibilität, das heißt ihrer qualitativen Wahrscheinlichkeit, vergleichen. Unter bestimmten starken Annahmen, die in manchen Fällen gelten, in anderen aber auch nicht, können mögliche Welten sogar hinsichtlich ihrer numerischen Wahrscheinlichkeit miteinander verglichen werden.

Tatsächlich sind Forscher*innen in vielen Fällen in der Lage, unterschiedliche Möglichkeiten unter dem Aspekt zu vergleichen, wie plausibel die Annahme ihrer künftigen Realisierung ist. Offenbar finden sie die Annahme höchst plausibel, ein Impfstoff sei gegen die Mutation eines Virus nicht ganz so wirksam wie gegen das ursprüngliche Virus, für dessen Abwehr er entwickelt wurde. Für weniger plausibel halten sie die Annahme, der Impfstoff schütze ohne Einschränkungen gegen die Mutation, und für noch weniger plausibel die Annahme, er biete nur einen stark reduzierten Schutz. Die jeweiligen Forscher*innen können solche qualitativen Unterscheidungen noch weiter verfeinern oder um weitere, mehr oder weniger plausible Annahmen ergänzen.

Eine ins 20. Jahrhundert zurückreichende Tradition in Philosophie und Ökonomie geht davon aus, dass wir als Handelnde generell in der Lage sind, Annahmen über entscheidungsrelevante kausale Beziehungen in der Welt und über die Folgen unseres Handelns qualitativ zu bewerten. Es sind sogar eine Reihe von Voraussetzungen formuliert worden, unter denen wir den möglichen Folgen unseres Handelns nu-

merische Wahrscheinlichkeiten zuordnen können – wie realistisch derartige Voraussetzungen sind, ist allerdings in der Forschung umstritten. Wären sie tatsächlich gegeben, würde der Vergleich zwischen verschiedenen Plausibilitätsgraden zu einer Rechenoperation – was natürlich eine besonders günstige Voraussetzung für gut begründete Entscheidungen wäre. Im Fall der Wiedereröffnung von Biergärten würde dies beispielsweise bedeuten, dass sich im voraus kalkulieren ließe, wie wahrscheinlich ein starker oder schwacher Anstieg der Neuinfektionen ist. Dann könnte das Datum für die Öffnung so gewählt werden, dass eine möglichst geringe Zahl von Neuinfektionen wahrscheinlich ist.

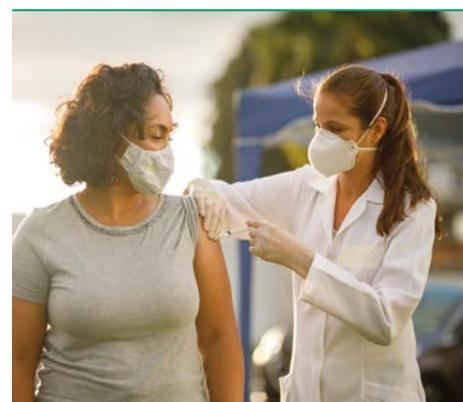
Wenn mögliche, aber ungewisse Folgen unserer Handlungen durch Annahmen repräsentiert werden, denen jeweils eine bestimmte numerische Wahrscheinlichkeit zukommt, wird die Entscheidung für eine solche Handlung in der Forschung als riskant bezeichnet. Entsprechende Risikotheorien sind wegen ihrer vergleichenden quantitativen Bewertungen von Handlungsoptionen zweifellos aussagekräftig. Aber sie entwerfen doch ein sehr idealisiertes Bild der Wirklichkeit, das oft nur dann in der Praxis anwendbar ist, wenn die strikten quantitativen Annahmen auf die eine oder andere Weise gelockert werden. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass wir keine einzelnen Zahlenwerte, sondern gewisse numerische Bandbreiten verwenden, um die vor uns liegenden Möglichkeiten im Vergleich als mehr oder weniger wahrscheinlich zu bewerten. Dies ist in der Regel auch für die Akteure einfacher, die eine Entscheidung treffen müssen. Angenommen, eine Expertin wird gefragt, ob alle Erwachsenen in Deutschland, die sich gegen das Covid-19-SARS-Virus impfen lassen wollen, bis zu einem bestimmten Datum geimpft werden. Diese Expertin wird sich vermutlich nicht auf die Aussage festlegen wollen, dass die Vollimpfung mit einer Wahrscheinlichkeit von 85 Prozent innerhalb des definierten Zeitraums erreicht wird. Sie könnte zur Begründung darauf verweisen, dass das Erreichen der Vollimpfung von einer Vielzahl noch ungewisser Faktoren abhängt. Aber vielleicht wäre die Expertin bereit, eine weniger spezifische Aussage zu machen. So könnte sie beispielsweise die besten und die schlimmsten Szenarien beschreiben und uns erklären, dass die Vollimpfung bis zu dem genannten Datum mit einer Wahrscheinlichkeit zwischen 60 und 90 Prozent erreicht wird. Die Ungewissheit, die unsere Expertin mit dieser Aussage einräumt, ist größer, als wenn sie sich auf genau 85 Prozent festlegen würde. Dennoch erhalten wir auch auf



■ Abb. 1: Der Königl. Hirschgarten, einer der größten und traditionsreichsten Biergärten in München (Foto: zukanowa13 / istockphoto.com).

diese Weise eine quantitative Angabe zum Grad der Ungewissheit, die uns hilft, eine Entscheidung zu treffen. Ob wir uns dabei am schlimmsten Szenario, am besten Szenario oder einer Mischung von beiden orientieren, ist wieder eine Frage unserer individuellen Präferenzen und damit auch unserer Werte. In jedem Fall versetzt uns die gewonnene Klarheit über existierende Handlungsoptionen und über deren wahrscheinliche Folgen in die Lage, eine Entscheidung zu treffen, die besser mit unseren Werten übereinstimmt.

Auf den ersten Blick mag dies alles sehr theoretisch und schwer anwendbar erscheinen. Aber ein Beispiel aus der Geschichte zeigt, dass es Entscheidungssituationen geben kann, in denen es unabdingbar ist, Ungewissheit zu quantifizieren. Als US-amerikanische Wissenschaftler*innen sich auf den ersten Atombombentest vorbereiteten, stellte es sich heraus, dass es ungewiss war, ob der Test unseren Planeten sofort und vollständig zerstören würde. Sie mussten daher verschiedene mögliche Welten berücksichtigen: In einigen davon wird die Erde ausgelöscht, in anderen geht das Leben auf der Erde weiter. Den Wissenschaftler*innen gelang es aber nicht, der Vernichtung der Erde eine genaue Wahrscheinlichkeit zuzuordnen, weil sie über die dafür erforderlichen Rechenoperationen uneins waren. Es lag also kein Problem vor, das sich durch die Abwägung klar identifizierbarer Risiken hätte entscheiden lassen. Der zuständige Entscheider stellte fest, dass der Test trotzdem ausgeführt werden sollte, solange die Vernichtungswahrscheinlichkeit nicht höher als 3 : 1.000.000 sei. Wie die Geschichte weitergegangen ist, wissen wir alle.



■ Abb. 2: Impfung gegen das Covid-19-SARS-Virus (Foto: ist).



■ David Stadelmann

Mobilität in der Pandemie

Risikopräferenzen steuern
Verhaltensanpassungen

■ Vor dem Abflug in den Familienurlaub im Sommer 2020 (Foto: ist).

Menschen passen ihr Verhalten an Risiken an, mit denen sie tagtäglich konfrontiert werden. Diese Art der Anpassung hat im Laufe der Evolution nicht nur zum individuellen Überleben, sondern auch zum Überleben der Menschheit beigetragen. Dabei gibt es jedoch große Unterschiede zwischen tatsächlichen Risiken einerseits und unseren Wahrnehmungen und Bewertungen dieser Risiken andererseits. In den Wirtschaftswissenschaften hat sich der Begriff der Risikopräferenz etabliert: Unsere Risikopräferenz ist umso höher, je stärker unsere Bereitschaft ausgeprägt ist, uns im Zustand der Unsicherheit für Handlungen zu entscheiden, deren von uns angestrebte Folgen nur mit einer vergleichsweise geringen Wahrscheinlichkeit eintreten werden. Wenn wir uns im Alltag in kurzer Frist entscheiden müssen, wie wir unser Verhalten an gegebene Risi-

ken anpassen, fällt unsere Risikopräferenz oft stärker ins Gewicht als das tatsächliche Risiko.

Die Risikopräferenzen der Bevölkerung spielen auch eine erhebliche Rolle im Umgang mit der Covid-19-Pandemie. Dies zeigt eine empirische Untersuchung, die der Autor dieses SPEKTRUM-Beitrags zusammen mit internationalen Forschungspartnern im November 2020 veröffentlicht hat. Die Studie zeigt: Zu Beginn der Pandemie, im Frühjahr 2020, bestimmten individuelle Risikopräferenzen unser Verhalten in Bezug auf die Pandemie nahezu unabhängig von staatlichen Maßnahmen und den tatsächlichen Gesundheitsrisiken, die sich nach Altersgruppen extrem stark unterschieden. Ein besseres Verständnis dieser Risikopräferenzen lässt uns erkennen, weshalb die Verhaltensanpassungen nach der ersten Pandemie-Welle anders ausfielen als in den nachfolgenden Wellen. Wenn Teile der Bevölkerung Covid-19 als immer weniger bedrohlich wahrnehmen, wirkt sich dies auch auf das Verhalten aus und erhöht die Kosten von Lockdown-Maßnahmen.

Kosten, Nutzen und Risikopräferenz

Risikopräferenz ist ein elementarer Bestandteil des menschlichen Verhaltens. Sie bestimmt maßgeblich unsere Fähigkeit, uns in einer komplexen, unsicheren und manchmal gefährlichen Welt zurechtzufinden. Normalerweise wägen wir Kosten und Nutzen gegeneinander ab. Im täglichen Leben kennen wir die Gefahren und Risiken, wir passen uns der Umwelt oder die Umwelt uns an. So haben wir gelernt, sicher zu bleiben. Die Gedanken, die uns dabei leiten, drücken sich in Sprichwörtern und Redewendungen aus: „Lieber Vorsicht als Nachsicht“, und „Doppelt hält besser.“ Mit Risiken konfrontiert zu sein bedeutet, Entscheidungen unter Unsicherheit treffen und Wahrscheinlichkeiten abschätzen zu müssen. Allerdings sind wir als Wesen, die nur begrenzt rational denken und handeln, nicht immer gut darin. Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst unsere Einschätzungen von Risiken, und diese Einschätzungen hängen in jedem Einzelfall stark vom Kontext ab.

Unter großer Unsicherheit tendieren viele Menschen dazu, auf Sicherheit zu setzen. Dann nehmen wir keine komplexen, vergleichenden und systematischen Betrachtungen von Risiken vor, sondern richten uns vielmehr nach einfachen und erprobten Entscheidungsregeln, die es uns ermöglichen, schnell Entschlüsse zu fassen. Allerdings sind diese Regeln oft ungenau und führen nicht immer zu den (für uns)

besten Entscheidungen. Unsere Beurteilung von Risiken hängt beispielsweise in vielen Fällen davon ab, wie weit wir von der Gefahrenquelle entfernt sind. Ein solches Vorgehen funktioniert jedoch bei einem Virus wie SARS-Cov-2, das unsichtbar ist und zudem auch von Infizierten ohne Krankheitssymptome übertragen werden kann, nur begrenzt. Das Risiko wird dadurch kurzfristig weniger von tatsächlichen Wahrscheinlichkeiten als vielmehr von unserer instinktiven und intuitiven Reaktion auf die Gefahr bestimmt. Von Natur aus risikofreudigere Menschen haben dabei eine größere Risikopräferenz. Sie sind nicht nur bereit, mehr Wagnisse einzugehen, sondern unterschätzen oft zugrundeliegende Gefahren. Hingegen sehen risikoscheue Personen unbekannte Risiken als unkontrollierbar an und überschätzen diese oft. Außerdem ist unser Handeln immer auch eine Funktion des Kontextes. Risikobewertungen sind damit alles andere als in Stein gemeißelt.

Freiwillige Einschränkungen der Mobilität

Im historischen Rückblick zeigt sich, dass massive Einschränkungen oder Regulierungen der Mobilität beispielsweise schon im Mittelalter durchaus üblich waren. Beerdigungen, der Verkauf von Kleidung und öffentliche Versammlungen wurden zur Bekämpfung der Pest verboten, Zuwiderhandlungen unter schwere Strafe gestellt. Generell gilt: Staaten reagieren auf Pandemien, indem sie Kontrollen einführen, ausweiten oder verschärfen. Als sich im Frühjahr 2020 das Ausmaß des Covid-19-Ausbruchs abzeichnete, ordneten viele Regierungen Maßnahmen an, die auf ein verstärktes „Social Distancing“ und eine Isolierung infizierter Personen abzielten. Auch vie-

LITERATURTIPP

H. F. Chan, A. Skali, D. A. Savage, D. Stadelmann; B. Torgler: Risk attitudes and human mobility during the COVID-19 pandemic. *Scientific Reports* (2020), 10. DOI: 10.1038/s41598-020-76763-2.

■ Abb. 1: Social Distancing beim Einkaufen (Foto: ist).



„Wie stark die Menschen ihre Mobilität in Reaktion auf die weltweite Pandemie ändern, hängt entscheidend davon ab, wie risikofreudig oder risikoavers sie sind.“



■ Abb. 2: April 2021: Nordic Walking in einem Kirschblütenpark in Komono, Japan (Foto: petes-photography / istockphoto.com).

■ Abb. 3: Online-Konferenz im Home-Office (Foto: ist).

■ Abb. 4: Oktober 2020: im Frankfurter Hauptbahnhof (Foto: ollo / istockphoto.com).

le Bürger*innen waren sich bewusst, dass sich die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung erhöht, wenn sie öffentliche Plätze aufsuchen und sich mit anderen Menschen treffen. Ist es sicher einzukaufen, im Park spazierenzugehen, öffentliche Verkehrsmittel zu benutzen? Wie groß ist das Risiko, sich zu infizieren? Wie müssen wir auf das Virus und die verhängten Maßnahmen reagieren? Mit diesen Fragen sahen sich viele von uns konfrontiert.

Die im November 2020 veröffentlichte Studie untersucht den Zusammenhang von Risikopräferenzen und Veränderungen in der Mobilität während der ersten Welle von Covid-19 im Frühjahr 2020. Sie basiert auf Daten aus 776 Regionen in 33 Ländern. Im Zentrum steht dabei die Frage, ob individuelle Verhaltensmuster bei der Beschränkung sozialer Kontakte mit den unterschiedlichen Risikopräferenzen von Menschen erklärt werden können. Ausgangspunkt der Studie war die Vermutung, risikoscheue Menschen seien angesichts der Pandemielage eher geneigt, ihr Verhalten durch Mobilitätseinschränkungen anzupassen und soziale Kontakte zu verringern – und dies völlig unabhängig von staatlich angeordneten Restriktionen. Risikofreudigere Menschen hingegen seien weniger bereit, ihre Mobilität und damit ihren Lebensstil zu verändern. Anders formuliert: Die Hypothese war, dass Unterschiede in den Verhaltensanpassungen zu einem erheblichen Anteil auf verschiedene Risikopräferenzen zurückzuführen sind.

Mobilität lässt sich messen. In der neuen Studie werden dafür Standortdaten öffentlicher Orte herangezogen, die sich auf die Kategorien „Einzelhandel und Freizeit“, „Supermärkte und Apotheken“, „Parks“, „öffentlicher Verkehr“ sowie „Arbeitsplätze und Wohngebiete“ verteilen. Mittlerweile ist die Sammlung und Auswertung solcher Daten ein Standardverfahren in der Forschung. Im Frühjahr 2020 war dies aber noch nicht der Fall. Damals, am Beginn der Pandemie, wurde die Anzahl der Besuche öffentlicher Orte in zwei aufeinander folgenden Zeiträumen ermittelt: zunächst an allen Wochentagen zwischen dem 3. Januar und dem 6. Februar 2020, als Covid-19 noch nicht als internationale Bedrohung wahrgenommen wurde, und anschließend an allen Wochentagen zwischen dem 15. Februar und dem 19. Mai 2020. Der Besuch öffentlicher Orte ist in der Pandemie nicht nur ein Indikator für Mobilität und damit für einen freien Lebensstil, sondern auch für das Risiko, sich mit dem Coronavirus anzustecken.

Mithilfe ökonometrischer Analysen wurde untersucht, welchen Einfluss Risikopräferenzen auf die Häufigkeit der Besuche dieser Orte haben. Die Präferenzen wurden vom Gallup World Poll mithilfe von Umfragen ermittelt. Zugleich wurde auch der Einfluss demographischer, geographischer und vieler anderer, die Pandemie betreffender Faktoren analysiert. Zu diesen Faktoren zählen beispielsweise der Zeitpunkt der Einstufung von Covid-19 als Pandemie, der Anteil der über 65jährigen an der Bevölkerung, der Inzidenzwert der Erkrankungen und insbesondere die zahlreichen Regulierungen von staatlicher Seite, wie etwa Schulschließungen, Absagen von Großveranstaltungen und andere Lockdown-Maßnahmen. Die Analyse dieser weiteren Einflussfaktoren machte es möglich, speziell den Effekt der Risikopräferenzen auf die Mobilität herauszuarbeiten und zu messen – möglichst unabhängig von jenen anderen, zeitgleich wirksamen Faktoren.

Entscheidend: die Ausprägung von Risikopräferenzen

Im Vergleich der beiden Zeiträume zeichnete sich an fast jedem der untersuchten öffentlichen Orte ein Rückgang der Mobilität ab. Dieser Rückgang setzte in der Regel bereits vor den staatlich verordneten Lockdowns ein. Parallel dazu war ein signifikanter Anstieg der Besuche in Parks zu beobachten, die wohl als relativ sichere Umgebung angesehen wurden.

Das zentrale Ergebnis der Studie lautet: Wie stark die Menschen ihre Mobilität in Reaktion auf die weltweite Pandemie ändern, hängt entscheidend davon ab, wie risikofreudig oder risikoavers sie sind. In Regionen, in denen die Menschen im Durchschnitt risikoaverser sind, passen sie ihre Verhaltensweisen stärker der Pandemie an: Sie verringern ihre Mobilität. Risikofreudige Menschen reagieren dagegen weniger stark. Ein statistisch starker und signifikanter Zusammenhang zwischen Risikopräferenzen und Änderungen in der Mobilität konnte insbesondere für den Besuch von Geschäften des Einzelhandels und für die Nutzung von Freizeitangeboten nachgewiesen werden. In Regionen mit höherer durchschnittlicher Risikotoleranz war die Wahrscheinlichkeit niedriger, dass Menschen in der Pandemie diese Orte meiden.

Die Studie untersuchte außerdem, wie die offizielle Klassifizierung von Covid-19 als Pandemie das Mobilitätsverhalten beeinflusst hat. Diese wurde seitens

der Weltgesundheitsorganisation (WHO) am 11. März 2020 ausgesprochen und ging damit den Lockdown-Maßnahmen der meisten Regierungen voraus. Bereits zuvor hatten sich Verhaltensänderungen abgezeichnet: Social Distancing und Homeoffice ließen die Mobilität sinken, Menschen mieden vor allem überfüllte Bahnhöfe und reduzierten Einkäufe auf notwendige Güter. Nach der Einstufung von Covid-19 als Pandemie verstärkte sich dieser Trend schnell. Alles in allem scheinen die Appelle zur Einschränkung von Kontakten erhebliche Wirkung gezeigt zu haben – wobei der Grad dieses Einflusses auch hier wieder von der Ausprägung individueller Risikopräferenzen abhing.

Diese Ergebnisse werden durch einen Vergleich von Sonntagen mit dem Rest der Wochentage untermauert. In „normalen“ Zeiten arbeiten die meisten Menschen an Werktagen und gehen am Wochenende vermehrt ihren Hobbys und Freizeitaktivitäten nach. Mit Beginn der Lockdown-Maßnahmen gingen Besuche öffentlicher Orte an allen Werktagen stark zurück. An den Wochenenden fanden hingegen – wie erwartet – mehr (Freizeit-)Aktivitäten außerhalb der Wohnung statt als unter der Woche. Vor der offiziellen Einstufung als Pandemie war dieser Trend noch klar erkennbar. Die anschließenden weitreichenden Infektionsschutzmaßnahmen, die zu massenhaften Schließungen von Geschäften und höherer Arbeitslosigkeit

führten, ließen allerdings die Mobilität auch an den Wochenenden sinken, so dass sich die Wochenenden immer weniger von den Werktagen unterschieden.

Freiwillige Einschränkungen und Mortalitätsrisiko

Die Studie thematisierte auch den Zusammenhang von Mobilität, Risikopräferenzen und dem Anteil älterer Menschen (65+) in der Bevölkerung. Die Analysen zeigen, dass in Regionen, in denen der Anteil älterer Menschen vergleichsweise hoch ist, die Besuche von Supermärkten und Apotheken, die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und die Mobilität zum Arbeitsplatz stärker zurückgegangen sind als in Regionen mit weniger älteren Menschen. Auch in den Bereichen Einzelhandel sowie Freizeit und Parks scheint es einen solchen Zusammenhang zwischen Mobilität und dem Bevölkerungsanteil älterer Menschen zu geben. Der Unterschied zwischen risikoaversen und risikofreudigeren älteren Menschen folgt dabei dem generellen Trend: Menschen in Regionen mit einer höheren Risikotoleranz bewerten die Bedrohung der eigenen Sicherheit und die der Allgemeinheit niedriger als Menschen mit einer stärker ausgeprägten Risikoaversion – selbst in Regionen mit einem größeren Anteil älterer Menschen an der Bevölkerung.

AUTOR



Prof. Dr. David Stadelmann ist Professor für Entwicklungsökonomik an der Universität Bayreuth und Fellow des CREMA in Zürich.

■ Abb. 5: Digitaler Impfnachweis (Foto: ist).



Eingeschränkte Mobilität im Ländervergleich

Weltweite Mobilität in Zeiten der Pandemie steht im Fokus einer 2021 in *Globalization and Health* erschienenen Studie. Sie befasst sich mit der Frage, wie rasch und aus welchen Gründen die Regierungen verschiedener Länder den internationalen Reiseverkehr eingeschränkt haben, nachdem die ersten Infektionen mit dem SARS-Cov-2-Virus dort aufgetreten waren. Die Untersuchung basiert auf dem *KOF Globalisation Index*, der seit 1970 vom KOF Swiss Economic Institute der ETH Zürich ermittelt wird. Der Index drückt aus, wie weit die Globalisierung in politischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht in mehr als 120 Ländern der Erde vorangeschritten ist. Die Studie kommt zu dem Ergebnis: Länder, die einen hohen Grad der Globalisierung aufweisen, haben nicht so rasch wie schwächer globalisierte Länder auf die ersten nachgewiesenen Covid-19-Infektionen mit Einschränkungen des internationalen Reiseverkehrs reagiert. Ein Grund dafür könnte sein, dass die ersten Covid-19-Infektionen in stark globalisier-

ten Ländern besonders früh aufgetreten sind – mit der Folge, dass den Regierungen noch nicht genügend Daten zur Verfügung standen, um Beschränkungen des internationalen Reiseverkehrs rechtfertigen zu können. Möglicherweise wurden in den stark globalisierten Ländern auch die Ansteckungsgefahren und die Geschwindigkeit der Virus-Ausbreitung unterschätzt.

Aufschlussreich sind Vergleiche innerhalb der Gruppe der Länder, in denen die Globalisierung weit fortgeschritten ist. Je effizienter die Regierungsführung in diesen Ländern ist, desto größer ist der zeitliche Abstand zwischen den ersten nachgewiesenen Infektionen und den Einschränkungen des grenzüberschreitenden Reiseverkehrs. Dieser Befund könnte damit zu erklären sein, dass die Gesundheitssysteme in weniger effizient regierten Ländern durch einen raschen Anstieg der Infektionszahlen überfordert wären – weshalb die Regierungen vergleichsweise rasch Maßnahmen

ergreifen, um die internationale Mobilität zu verringern. Die Studie widmet sich in diesem Zusammenhang auch der Frage, welche Aspekte der Globalisierung es sind, welche die Regierungen stark globalisierter Länder zu einer eher zögerlichen Einschränkung des Reiseverkehrs veranlassen. Besonders stark fällt hier die Anzahl der internationalen Verträge und der Mitgliedschaften in internationalen Organisationen ins Gewicht. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die zivilgesellschaftlichen und kulturellen Austauschbeziehungen, die ein Land auf internationaler Ebene pflegt. Stärker noch als die internationalen Wirtschaftsbeziehungen veranlassen sie die Regierungen dazu, signifikante Eingriffe in die grenzüberschreitende Mobilität vorerst zu unterlassen – selbst wenn bereits eine hohe Zahl von Infektionen offiziell gemeldet ist.

S. J. Bickley, H. F. Chan, A. Skali, D. Stadelmann, B. Torgler: How does globalization affect Covid-19 responses? *Globalization and Health* (2021), Vol. 17. DOI: 10.1186/S12992-021-00677-5.



■ Andrea Behrends

Krieg, Flucht, Vertreibung

Ungewissheit in der Grenzregion
zwischen Tschad und Sudan

■ Die Autorin im Gespräch mit Cheikh Moussa (links) und Brahim (Mitte) (Foto: Inge Butter).

In ihrem Buch "Questioning Misfortune" berichtet die Anthropologin Susan Reynolds White über ihre Forschungsarbeiten im Osten Ugandas.¹ Sie zeigt, wie die Menschen dort mit Ungewissheit umgehen, die ihren Lebensalltag in vieler Hinsicht prägt. Wenn ein Kind erkrankt, der Ehemann gewalttätig wird, die Ernte schlecht ausfällt oder ein Krieg ausbricht, begegnen sie diesen oftmals bedrohlichen Situationen mit einer pragmatischen Einstellung. Sie streben nicht nach Gewissheit, sondern nach Sicherheit. Wie viele andere Anthropolog*innen stützt sich Whyte in ihren Arbeiten auf den U.S.-amerikanischen Philosophen, Psychologen und Bildungserformer John Dewey. In seinen Gifford-Vorlesungen von 1928 über "das Streben nach Sicherheit"² vertritt Dewey die Auffassung, dass Ungewissheit allen Lernprozessen im Leben inhärent sei. Ohne Unge-

wisheit wären wir Menschen nicht imstande, uns in der Welt einzurichten, sie zu verstehen und kreativ zu gestalten. Wir würden den Lauf der Welt passiv hinnehmen, ohne uns der eigenen Handlungsfähigkeit im vollen Umfang bewusst zu sein.

So gesehen ist Ungewissheit, die mit mangelnder Eindeutigkeit und Vorhersehbarkeit der individuellen Lebensumstände einhergeht, für jeden Menschen eine notwendige Voraussetzung, um sich aktiv auf die Welt einlassen zu können und darin selbständig den eigenen Lebensweg zu finden. An dieses Verständnis von Ungewissheit knüpft auch die Sozialanthropologin Sandra Calkins an, wenn sie unter dem Eindruck der schwierigen Herausforderungen, denen die Menschen im Nordsudan täglich ausgesetzt sind, fragt: "Wer weiß, was morgen ist?"³ Selbst wenn etablierte Formen des Zusammenlebens nicht mehr gelten und kreatives Improvisationsgeschick an Grenzen stößt – irgendwie müssen die Menschen dennoch Wege finden, um aus der Ungewissheit heraus ihr eigenes Leben und das ihrer Familien zu sichern.

Der Begriff "menschliche Sicherheit" (*Human Security*) stammt ursprünglich aus der Entwicklungsforschung. Die Vereinten Nationen haben ihn erstmals 1994 in ihrem *United Nations Development Program (UNDP) Annual Report* aufgegriffen. Sie waren damals bestrebt, die Planung humanitärer, politischer und militärischer Interventionen besser mit den realen Verhältnissen abzugleichen, wie sie von den Menschen vor Ort erlebt werden, und wollten zu diesem Zweck ein wirklichkeitsnäheres Verständnis gesellschaftlicher Prozesse fördern. In den Sozialwissenschaften hat sich der Begriff „menschliche Sicherheit“ als sehr fruchtbar erwiesen, wie beispielsweise die Forschungsarbeiten des Anthropologen Thomas H. Eriksen zeigen.⁴ Zwar ist er weit gefasst und durchaus vage, aber er bildet einen hilfreichen Orientierungspunkt für wissenschaftliche Studien, die sich mit gesellschaftlichem Zusammenhalt, Integration, Stabilität und kollektiver Identität befassen. Ausgehend von der Frage, was Menschen Sicherheit bietet oder umgekehrt ihre Unsicherheit erhöht, lässt sich ihr Handeln besser verstehen – sei es, dass sie tradierten Verhaltensmustern und sozialen Regeln folgen, sei es, dass sie diese Gewohnheiten aufbrechen und durch neue Praktiken ersetzen. Auch der folgende Beitrag zur Situation der Menschen in der von Krieg, Flucht und Vertreibung geprägten Grenzregion zwischen dem Tschad und dem Sudan folgt Eriksens Verständnis von "menschlicher Sicherheit". Vier Fallstudien werden belegen, dass es "harte

Arbeit" erfordert, "ein sicheres Leben in einer komplexen und turbulenten Welt zu schaffen."⁵

Vom gewaltsamen Konflikt zur humanitären Katastrophe

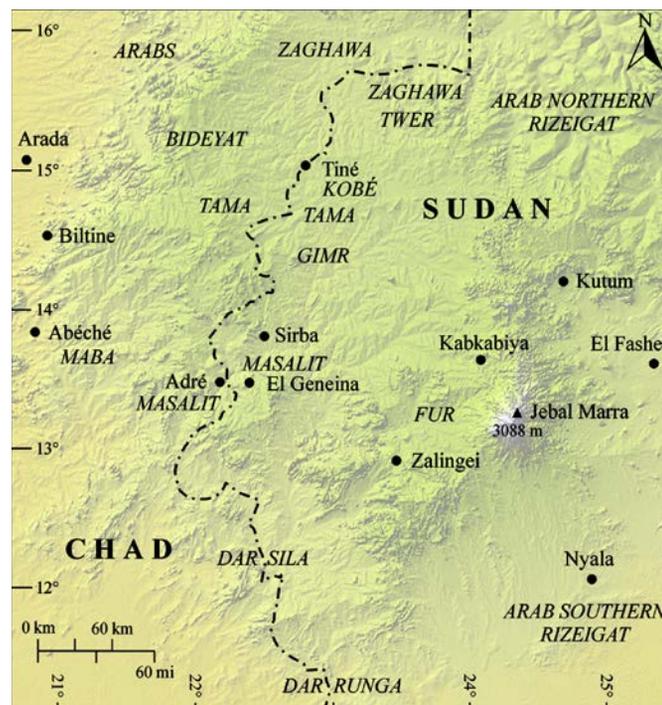
Als der Tschad im Jahr 2003 mit der Ölförderung begann, war das Land bereits in die kriegerischen Auseinandersetzungen im Sudan verwickelt. Die Konflikte in der westsudanesischen Region Darfur, die an den Osttschad grenzt, spitzten sich zu, als sudanesische Rebellen im Februar 2003 einen Angriff auf eine Garnison sudanesischer Regierungstruppen starteten. Sie kämpften um ihre Einbeziehung in die damals laufenden Friedensverhandlungen zwischen der sudanesischen Regierung und den Rebellen im heutigen Südsudan. Die Regierung beantwortete den Anschlag auf ihre Truppen in Darfur rasch und brutal: Bei der Bombardierung des Gebiets und bei Attacken lokaler Milizen gegen die unbewaffnete Landbevölkerung wurden Dörfer niedergebrannt, Männer, Frauen und Kinder getötet und mehrere hunderttausend Menschen über die Grenze in den Tschad vertrieben. Dieser Krieg, über den die internationalen Medien ausführlich berichteten, wurde bald als "der erste Völkermord des neuen Jahrtausends" bezeichnet.⁶ Seit 2003 wurden mehr als 280.000 Geflüchtete gezählt, die die Grenze zum Tschad überquerten, und schätzungsweise 180.000 Menschen wurden innerhalb des Sudan vertrieben. Auf dem Höhepunkt des Konflikts waren mehr als 100 nationale und internationale Organisationen unter der Schirmherrschaft des UNHCR in der Region tätig. Infolge der anhaltenden Unsicherheit auf der sudanesischen Seite der Grenze leben bis heute

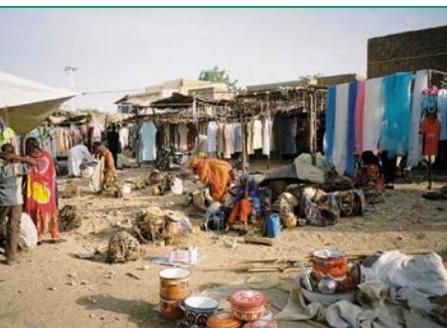
AUTORIN



Prof. Dr. Andrea Behrends ist Professorin für Ethnologie Afrikas an der Universität Bayreuth und Mitglied des Exzellenzclusters „Africa Multiple“.

■ Abb. 1: Das Grenzgebiet zwischen Sudan und Tschad (Grafik Jutta Turner / Andreas Gaube)





■ Abb. 2 und 3: Das UNHCR Flüchtlingslager in Farchana (Foto: Andrea Behrends).

■ Abb. 4: Der Markt in Abéché (Foto: Andrea Behrends).

■ Abb. 5: Daldoum vor dem Zugang zu seinem mit Hirse umpflanzten Haus (Foto: Andrea Behrends).

mehr als 200.000 Menschen in UN-Lagern auf der tschadischen Seite.

Der Weg zu stabileren Verhältnissen, die den Menschen in dieser Grenzregion mehr Sicherheit geben könnten, wird nicht zuletzt auch durch die Governance-Strukturen im Tschad erschwert. Seit die ehemalige französische Kolonie im Jahr 1960 unabhängig wurde, war jeder Wechsel im Amt des Staatspräsidenten die Folge eines Militärputsches. Wahlen sind zwar dem Namen nach demokratisch, aber nicht transparent. Den Ölhandel hat die seit 1990 bestehende Regierung unter Präsident Idriss Déby unter anderem dazu genutzt, um mit den Einnahmen Waffen zu kaufen, die Loyalität der eigenen Klientel durch Geldgeschenke und kostspielige Bauaufträge zu stärken und Verträge mit der Familie des Staatspräsidenten und dessen engsten Anhängern abzuschließen. Am 19. April 2021 wurde Déby bei einer militärischen Intervention gegen einen Putschversuch im Norden des Landes getötet. Seitdem befindet sich das Land in einer Übergangsphase: Es steht unter der Herrschaft des Militärs, Débys Sohn regiert als Interimspräsident. Die Mitglieder der Präsidentenfamilie genießen weitgehende Straffreiheit und verstärken durch ihr Verhalten die im Land weit verbreitete Unsicherheit.

Leben in Ungewissheit: Vier anthropologische Fallstudien

Der Kriegsausbruch im Jahr 2003 führte dazu, dass sich viele Menschen auf beiden Seiten der Grenze – sowohl in der westsudanesischen Region Darfur als auch in den grenznahen Dörfern im Osten des Tschad – auf die Flucht begaben. Sie verließen ihre Häuser und ihren Landbesitz, um der eskalierenden Gewalt zu entkommen. Im Folgenden geht es um die individuellen Lebenswege von vier Menschen, die ich seit 2001 während meiner Feldforschungen während des Darfur-Konflikts⁷ persönlich kennengelernt habe: Daldoum, Ashta, Moussa und Brahim. Ihre Lebenswege stehen beispielhaft für sehr unterschiedliche Formen des Umgangs mit der unsicheren und bedrohlichen Konstellation, die durch die Eskalation des Konflikts entstanden war. Daldoum ist vor vier Jahren, Ashta vor fünf Jahren verstorben. Ihre Bilder und ihre Erzählungen werden hier mit dem ausdrücklichen Einverständnis ihrer Kinder und Enkel veröffentlicht.

■ Als ich 2007 an die Grenze zu Darfur zurückkehrte, fand ich das tschadische Dorf Hashaba, in dem ich sechs Jahre zuvor gelebt hatte, fast vollständig ent-

völkert vor. Nur wenige ältere Menschen waren dort geblieben. Sie ernährten sich von wilden Beeren, die sie im Busch fanden. "In normalen Zeiten ist dies das Essen der Kinder", sagte mir ein alter Mann, "und sie essen es, wenn sie im Busch spielen. Jetzt haben wir nichts anderes." Ich kannte den alten Mann, den sie Daldoum nannten und den ich bei früheren Besuchen als einen aktiven und lebhaften Mann kennengelernt hatte, kaum wieder. Er war sehr abgemagert, seine Kleidung war verschmutzt und zerschissen. Daldoum war der Anführer der sudanesischen Flüchtlinge in Hashaba gewesen. Vor einem Jahr, sagte er, seien alle anderen nach Adré gegangen, die mit rund 13.000 Einwohnern größte Stadt der Region, die den letzten tschadischen Grenzposten auf dem Weg nach Darfur bildet. Dasselbe geschah in den Dörfern um Hashaba: Mehr als 10.000 Menschen zogen an den Stadtrand von Adré und lebten dort in Strohhütten, die nach einiger Zeit durch dauerhaftere Häuser aus Holz, Lehmziegeln und Stroh ersetzt wurden. Sie alle fühlten sich von der Gewalt bedroht, die von jenseits der Grenze ausging. Wären sie geblieben, hätten sie befürchtet, dass die Rebellen und Milizen aus dem Sudan alles zerstört und sie getötet hätten. Und tatsächlich kamen die Milizen zum Zeitpunkt meines Besuchs im Jahr 2007 fast jeden Tag in das Dorf. Daldoum erzählte, dass sie unter dem größten Baum des Dorfes saßen und sie mit Steinen bewarfen und schrien: "Wir werden euch töten und euch euer Land wegnehmen" – aber dann ließen sie die alten Menschen doch in Ruhe.



■ Auch Daldoums Tochter Ashta siedelte von Hashaba nach Adré über. Am Rande der Stadt in „Hille Djidide“ – was so viel bedeutet wie „Neue Stadt“ – errichtete sie für sich und ihre Kinder eine provisorische Hütte. Sie verdiente ein wenig Geld durch Landarbeit und indem sie bei der Herstellung von



Lehmziegeln half. So konnte sie überleben und ihrem zwanzigjährigen Sohn sogar eine im Ort hergestellte Pferdekutsche kaufen. Mit dem Transport von Menschen und Waren verdiente dieser nun selbst ein wenig Geld, das er mit seiner Mutter und seiner jungen Ehefrau teilte. Ashta sagte, wenn ihre Eltern in Hashaba blieben, würde der dortige Landbesitz hoffentlich der Familie erhalten bleiben. Sie besuchte ihre Eltern von Zeit zu Zeit und legte eine lange sandige Wegstrecke zu Fuß zurück, um ihnen Lebensmittel zu bringen und bei der Landwirtschaft zu helfen. Als ich Ashta 2011 das letzte Mal besuchte, lebte sie noch in Hille Djidide, während ihre Eltern Hashaba weiterhin nicht verlassen hatten. Ein Jahr später ersetzten internationale Hilfsorganisationen ihre Hütte durch ein aus soliden Ziegeln gebautes Haus. Gleichzeitig begannen andere nach Adré übergesiedelte Dorfbewohner, vorübergehend nach Hashaba zurückzukehren und das Land um ihre ehemaligen Häuser herum zu bewirtschaften.

■ In einem Grenzort in der Nähe von Hashaba lebte zunächst auch Cheikh Moussa nach seiner

Flucht aus dem Sudan. Als Lehrer und politischer Aktivist sah er sich infolge der wachsenden Spannungen in Darfur zunehmend bedroht. Nach kleineren Angriffen auf sein Dorf und nach Warnungen von Freunden, dass er zur Zielscheibe staatlicher Repressionen werden könnte, zogen er und die Bewohner seines Dorfes in den Tschad. Hier jedoch verweigerten ihnen die einheimischen Dorfbewohner, die keinerlei Verbindungen zum weit entfernten Heimatdorf der Neuankömmlinge hatten, den Zugang zu fruchtbarem Ackerland. Im Unterschied zu Daldoum und Ashta, die sich in Hashaba integriert

■ Abb. 6: Ashta arbeitet in einer Landarbeitskooperative mit, die nur aus Geflüchteten besteht (Foto: Andrea Behrends).

■ Abb. 7: Ashta und ihre Mutter Hawaye vor dem Haus der Eltern in Hashaba (Foto: Andrea Behrends).

„Entscheidend für die Überlegungen der Menschen waren der Zugang zu Ressourcen wie Ackerflächen, Saatgut und Wohnraum sowie die jeweils individuellen Formen der Zugehörigkeit zu Gemeinschaften und Orten.“

hatten, blieb Moussa ein Außenseiter, der von den Dorfbewohnern mit Misstrauen und wegen des privilegierten Zugangs zu internationalen Hilfseinrichtungen auch mit Neid betrachtet wurde. Deshalb sah er keinen anderen Ausweg, als das Dorf zusammen mit den anderen sudanesischen Flüchtlingen zu verlassen und in ein UNHCR-Flüchtlingslager zu ziehen. Er entschied sich für das Lager in Farchana, weil sich hier auch andere Menschen aus Darfur in Sicherheit gebracht hatten. Im Lager erlebte Moussa aufgrund seiner Ausbildung und seines früheren sozialen Status eine deutlich höhere Wertschätzung, und er wurde zum Sprecher von mehr als 20.000 Geflüchteten gewählt. Nach seiner Registrierung als Geflüchteter und „gefährdeter“ älterer Mensch konnte er verschiedene Formen der Unterstützung in Anspruch nehmen. Doch seine Lebenssituation ist



■ Abb. 8: Moussa im Flüchtlingslager Farchana (Foto: Andrea Behrends).

bis heute schwierig. Einerseits, so erzählte mir Moussa, könnten die im Lager von Farchana lebenden Geflüchteten wegen der andauernden großen Unsicherheit nicht in den Sudan zurückkehren, andererseits könnten sie sich nicht im Tschad integrieren, solange ihnen der Zugang zu Ackerland verwehrt bleibt. Der vom UNHCR geförderte Gemüseanbau und die dadurch erzielten Einkommen reichten nicht aus, um ihre Familien das ganze Jahr über ernähren zu können. Moussa erklärte, dass es für die im Lager lebenden Geflüchteten drei Möglichkeiten gebe, ihren Lebensunterhalt zu bestreiten: Sie könnten mit Waren aus dem Sudan Handel treiben, auf den Höfen der einheimischen Bevölkerung im Tschad arbeiten und die Erträge in den Sudan verkaufen, oder sie könnten eine der bezahlten Stellen als Lehrer*in, Schneider*in, Elektriker*in oder Bauarbeiter*in im Lager anzunehmen. Dafür gebe es im Lager auch entsprechende Ausbildungsangebote. Allerdings würden offene Stellen außerhalb des Lagers in der Regel nicht mit ausgebildeten Geflüchteten, sondern mit Einheimischen aus der Umgebung besetzt. Moussa fehlt daher bis heute eine verlässliche Zukunftsperspektive – im Unterschied zu Daldoum und Ashta, die versucht haben, durch die räumliche Nähe zu ihrem Landbesitz eine solche Perspektive aufrechtzuerhalten.

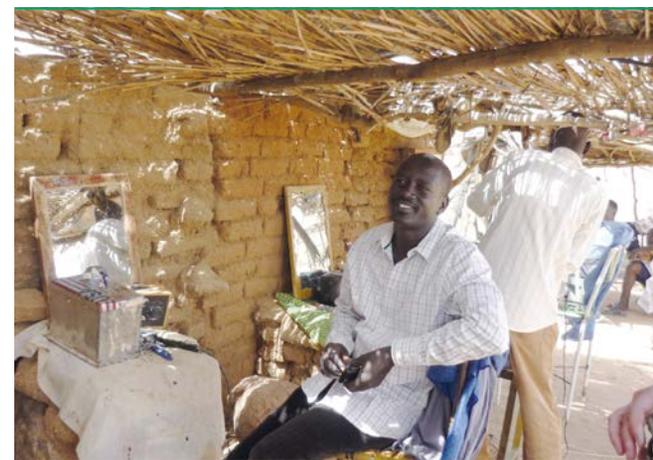
■ Abb. 9 (rechts): Brahim bei einem Friseur im Flüchtlingslager Farchana (Foto: Andrea Behrends).

■ Brahim stammt aus dem Tschad und lebt heute in der Nähe des UNHCR-Flüchtlingslagers in Hadjer Hadid. Er und seine Verwandten profitierten während des Kriegs von der Präsenz internationaler Organisationen an der Grenze zum Sudan. Sie gehörten zu den wohlhabenderen Stadtbewohnern von Abéché und Adré, die seit jeher eine privilegierte

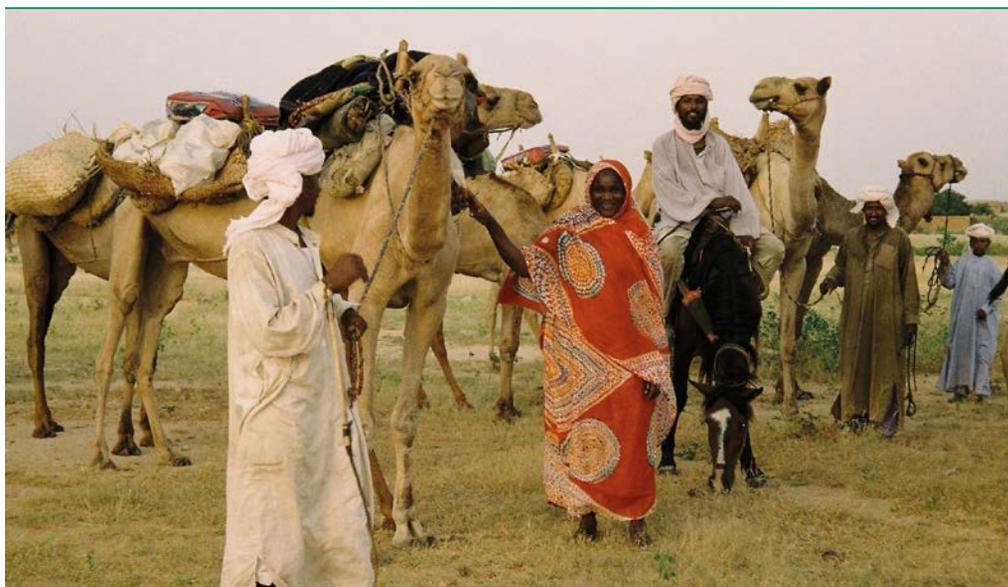
■ Abb. 10: Die Bäume im Wadi Shitété verlieren während der Regenzeit ihre Blätter (Foto: Andrea Behrends).



Stellung in der Region innehatten. In Adré hatte Brahim den Krieg und seine Folgen von Kindheit an erlebt. Als Jugendlicher musste er seine Ausbildung abbrechen, denn sein Vater, der als Übersetzer für die Kolonialverwaltung gearbeitet hatte, war verstorben und seine Mutter, eine Hebamme, konnte nicht für die Schulausbildung aller Kinder aufkommen. Als Geflüchtete in großer Zahl in Adré eintrafen, verhalf ihm seine älteste Schwester, die das UNHCR-Büro in Farchana verwaltete, zu einer Stelle bei einer christlichen NGO, die Unterkünfte und Marktstände im Lager Farchana baute. So konnte er es sich leisten, ein Haus zu mieten und in den Bau eines größeren Hauses in Adré zu investieren. In den Folgejahren erreichte er einen gewissen Wohlstand, sodass er seine Familie sogar mit einigen Luxusgütern versorgen konnte – einem Motorrad, einer Satellitenschüssel und einem Fernseher, mehreren Mobiltelefonen, einem Computer und Haushaltsgegenständen wie Vorhängen, Möbeln und Küchengeräten. Die Vertreibungswirtschaft (*displacement economy*)³ im Grenzgebiet hat ihm diesen Aufstieg ermöglicht.



Als jedoch die Hilfsorganisationen begannen, sich aus der Grenzregion zum Sudan zurückzuziehen, verlor Brahim seine Arbeit. Zunächst versuchte er seinen Lebensunterhalt zu sichern, indem er ein Pferd kaufte und den Landwirten in der Region beim Pflügen ihrer Felder half. Mit finanzieller Unterstützung von Freunden und Familienangehörigen hat er vor kurzem begonnen, ein Geschäft mit der Herstellung von Lehmziegeln aufzubauen: Er verkauft sie an junge Männer, die in den weiter nördlich gelegenen Goldminen des Tschad oder jenseits der Grenze im Sudan Arbeit gefunden haben und nun in ihre Heimatregion mit einem kleinen Vermögen zurückkehren, das sie in den Kauf von Land und den Bau von Häusern investieren.



■ Abb. 11: Nomaden machen Rast in Abéché
(Foto: Andrea Behrends).

Rückblickend haben sich die vier unterschiedlichen Lebens- und Überlebensstrategien zumindest teilweise als erfolgreich erwiesen. In der durch unvorhersehbare politische Entwicklungen bedingten Ungewissheit war das Handeln der Menschen vor allem von der Frage bestimmt, was im Hinblick auf ihr eigenes Überleben besonders kostbar sein könnte und was sie unter den gegebenen Umständen retten könnten. Entscheidend für ihre Überlegungen waren der Zugang zu Ressourcen wie Ackerflächen, Saatgut und Wohnraum sowie die jeweils individuellen Formen der Zugehörigkeit zu Gemeinschaften und Orten. Für viele war der Landbau ein Mittel, um teilweise wieder ein selbstbestimmtes Leben führen zu können und der Abhängigkeit von der Hilfe und Versorgung im Lager zu entkommen. Manchen gelang es auch, von der allgemeinen Unsicherheit in der Region zu profitieren, wie das Beispiel von Brahim zeigt. Doch seine wirtschaftliche Sicherheit war infragegestellt, sobald die internationalen Hilfsorganisationen sich aus der Region zurückzogen. Ausgerechnet als die kriegsbedingte Unsicherheit abnahm, geriet er in eine ähnliche Situation wie die Geflüchteten, denen er früher eine Unterkunft zur Verfügung gestellt hatte. Auch er war plötzlich auf eigenes handwerkliches und ökonomisches Know-how sowie auf finanzielle Unterstützung durch Familienangehörige und Freunde angewiesen.

Ausblick

Lassen sich aus den skizzierten Lebensverläufen allgemeine Handlungsempfehlungen für Projekte und

Initiativen in der Entwicklungszusammenarbeit oder der Migrationspolitik ableiten? Die Beispiele zeigen, wie sehr individuelle Schicksale in höchst unsicheren Verhältnissen miteinander verflochten sind. Dies legt die Überlegung nahe, dass politische Interventionen die Vielzahl der beteiligten und betroffenen Akteure sowie deren unterschiedliche Handlungsoptionen künftig stärker berücksichtigen sollten. Zudem scheint die Praxis internationaler Hilfsaktionen, staatliche Akteure in den jeweiligen Regionen grundsätzlich außen vor zu lassen, nicht länger tragfähig zu sein. Wenn es gelingen soll, die Lebensverhältnisse der Menschen vor Ort sicherer und verlässlicher zu machen, müssen neue Wege gefunden werden. So erscheint es beispielsweise sinnvoll, unmittelbare humanitäre Hilfsaktionen mit einem längerfristig angelegten Aufbau von dauerhafteren Formen der Schulbildung, von Gesundheitseinrichtungen oder Rentenfonds zu verknüpfen. Dann müssten die Menschen nicht mehr "zwischen Arm und Bein wählen", wie es einer meiner Gesprächspartner ausdrückte. Um unsichere Zeiten zu überstehen, muss für alle "Gliedermaßen" gesorgt werden.

LITERATURTIPPS

A. Behrends: Die Verwandlung von sudanesischen Geflüchteten in tschadische Flüchtlingsbürger. Eine bürokratische Statuspassage. In: D. Dizdar et al. (eds.): *Humandifferenzierung. Disziplinäre Perspektiven und empirische Sondierungen*. Weilerswist 2021, 106-134.

A. Behrends: Renegotiating humanitarian governance: challenging invisibility in the Chad-Sudan borderlands. In: J. Bjarnesen, S. Turner (eds.): *Invisibility in African Displacements: From Structural Marginalization to Strategies of Avoidance*. New York 2020, 19-35.

A. Behrends: Securing livelihoods. Economic practice in the Darfur-Chad displacement arena. In: A. Hammar (ed.): *Displacement Economies. Paradoxes of Crisis and Creativity in African Contexts*. London – New York, 35-56.

- 1 S. R. Whyte: *Questioning misfortune: the pragmatics of uncertainty in Eastern Uganda*, Cambridge studies in medical anthropology. Cambridge – New York 1997.
- 2 J. Dewey: *The quest for certainty. A study of the relation of knowledge and action*. London 1929.
- 3 S. Calkins: *Who knows tomorrow?: Uncertainty In North-Eastern Sudan*. Oxford – New York 2013.
- 4 Vgl. u.a. T. H. Eriksen et al.: *A world of insecurity. Anthropological perspectives on human security*. London – New York 2010.
- 5 Ebd., 5.
- 6 Vgl. M. Mamdani: *Saviors and survivors: Darfur, politics, and the war on terror*. New York 2009 – G. Prunier: *Darfur: the ambiguous genocide*. Ithaca, NY 2005.
- 7 Siehe Literaturtipps.
- 8 Vgl. Dazu u.a.: A. Hammar (ed.): *Displacement Economies in Africa. Paradoxes of Crisis and Creativity*. London – New York 2014.



■ Stefan Ouma

Sicherheit und Unsicherheit in der globalen Ökonomie

Zur Externalisierung von Kosten und Risiken in den Globalen Süden

■ Foto links: Obst und Gemüsemarkt in Kampala, Uganda;
Foto rechts: Markthalle in Cannes, Südfrankreich (Foto: ist).

Ungewissheit bedeutet oft auch Unsicherheit. Unsicherheit und Sicherheit sind *relative* Kategorien: Sie unterliegen dem historischen Wandel und werden – abhängig von geographischen und sozialen Gegebenheiten – mit unterschiedlicher Intensität erlebt. Was für den einen als sicher erscheint, ist für den anderen ungewiss. Selbst in vergleichsweise kleinräumigen Kontexten können Menschen, die sich beispielsweise durch ihren Sozialstatus unterscheiden, auf ungleiche Weise Unsicherheiten ausgesetzt sein. So erwartet den einen nach Beendigung seines Berufslebens eine sichere Pension, die ihm auch weiterhin einen gewissen materiellen Wohlstand erlaubt, während der Nachbarin hingegen die Altersarmut droht.

Unsicherheit und Sicherheit sind aber nicht nur *relative*, sondern auch *relationale* Kategorien. Wie der Soziologie Stefan Lessenich gezeigt hat, ist die Sicherheit, mit der im Globalen Norden ein gewisser Wohlstand erfahrbar ist und als selbstverständlich erachtet wird, eng mit der Erzeugung von Unsicherheiten im Globalen Süden verknüpft.¹ Lessenich fasst diesen Sachverhalt mit dem Begriff „Externalisierung“ zusammen. Er meint damit eine Lebensweise, die sich durch „die Ausbeutung fremder Ressourcen, die Abwälzung sozialer und ökologischer Kosten auf Außenstehende und die Aneignung der

Gewinne im Inneren, sowie der Beförderung des eigenen Aufstiegs bei Behinderung bis Verhinderung des Fortschritts Anderer auszeichnet.“² Sein prägnantes Fazit lautet: „Wir leben gut, weil wir von den anderen leben“³ oder genauer gesagt: über die Verhältnisse anderer leben.

Unsicherheiten im Agrarsektor: eine global-relationale Perspektive

Die Interdependenz von Sicherheit und Unsicherheit in der Weltwirtschaft soll im folgenden am Beispiel von drei wirtschaftsgeographischen Projekten aufgezeigt werden. Diesen Forschungsarbeiten liegen jeweils die gleichen Beobachtungen und grundsätzlichen Fragestellungen zugrunde: Lebensmittelsicherheit, die gesicherte Erfüllung von Konsumentenwünschen sowie die sichere Erwartung von Profitmargen und Renditen gelten im Globalen Norden als selbstverständlich. Aber welche Folgen hat diese Gewährleistung von Sicherheit für den Globalen Süden, wo viele Warenketten – insbesondere von Agrarprodukten – ihren Ursprung haben? Kommt es hier möglicherweise zu einem Anstieg von Unsicherheit? Welche Folgen hat es für kleine und mittlere landwirtschaftliche Produktionsbetriebe sowie für landwirtschaftliche Gemeinschaften und



■ Abb. 1: Spinaternte auf einem Acker in Kenia (Foto: ist).



■ Prof. Dr. Stefan Ouma ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsgeographie an der Universität Bayreuth und Mitglied des Exzellenzclusters „Africa Multiple“.

„Unsicherheit“ in der wirtschaftsgeographischen Forschung

„Am Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie an der Universität Bayreuth befassen wir uns mit der Frage, wie eine nachhaltige Regionalentwicklung – beispielsweise in den Ländern Ostafrikas – angesichts globaler Herausforderungen gelingen kann. Im Fokus stehen dabei die weltweit zunehmende sozialräumliche Ungleichheit, die drohende Klimakrise und die fortschreitende Vermarktlichung und Technologisierung zentraler Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft. Seit mehr als einem Jahrzehnt befaße ich mich mit vernetzten Strukturen, Institutionen und Prozessen, die im Globalen Süden und im Globalen Norden sehr verschiedene, oft sogar gegensätzliche Wirkungen haben. Ein Schwerpunkt waren zunächst globale

Warenketten, später auch globale Investitionsketten im Agrarsektor. Am Beispiel eigener Forschungsprojekte soll dieser SPEKTRUM-Beitrag zeigen, wie neue Ungewissheiten und Unsicherheiten durch genau solche Faktoren entstehen, die in Europa die Sicherheit von Investoren, Unternehmen und Konsument*innen erhöhen: Die Begriffe „Sicherheit“ und „Unsicherheit“ sind *relativ* und *relational*.

Dieser Befund sozialwissenschaftlicher Forschung spiegelt sich heute in der Alltagserfahrung vieler Menschen – und dies nicht allein in ökonomischer Hinsicht. Auch rassistische Diskriminierung und Gewalt bewirken, dass Sicherheit und Unsicherheit selbst auf kleinem Raum sehr

unterschiedlich verteilt sein können. Reisen und Ausflüge, die für weiß und deutsch gelesene Menschen in der Regel nicht mit größeren physischen Unsicherheiten verbunden sind, können in manchen Regionen Deutschlands für People of Colour ein Ausflug ins Ungewisse sein. Ich selbst beispielsweise halte, angesichts der vielfach dokumentierten rassistischen Übergriffe, im Osten Deutschlands nur sehr ungern wissenschaftliche Vorträge – es ist mir einfach zu unsicher. Gleichzeitig sollte daran erinnert werden, dass es auch im Osten viele People of Colour gibt, die ihr Leben unter diesen Umständen meistern, sowie politisch engagierte Menschen, die diesen Verhältnissen entgegenzutreten.“

■ Abb. 2: EurepGAP/GlobalGAP-Zertifikat
(Foto: Stefan Ouma).

Arbeiter*innen im Globalen Süden, wenn im Globalen Norden dafür gesorgt wird, dass wirtschaftliche Akteure – sei es auf den Real- oder den Finanzmärkten – möglichst stabile Erwartungshorizonte haben und mit deren Erfüllung rechnen dürfen?

Sicherheitsstandards für Lebensmittel

Im Jahr 1997 haben europäische Einzelhändler, die der Euro-Retail Produce Working Group (EUREP) angehörten, einen Standard für die Sicherheit von Lebensmitteln ins Leben gerufen, den „EurepGAP“. Da in den folgenden Jahren immer mehr Unternehmen auch außerhalb Europas diesen Standard übernahmen, wurde der Name 2007 in „GlobalGAP“ geändert; er bezeichnet zugleich die weltweite Organisation, deren Mitglieder sich zur Einhaltung des Standards freiwillig verpflichten. GlobalGAP erstreckt sich auf alle Abschnitte der Lebensmittelherstellung, vom unverarbeiteten landwirtschaftlichen Produkt bis hin zur Weiterverarbeitung. Für Obst und Gemüse, Saat- und Pflanzgut, Viehhaltung und Aquakulturen sowie für die Rückverfolgbarkeit von Produktions- und Lieferketten werden Regeln formuliert, welche die Unbedenklichkeit von Lebensmitteln gewährleisten sollen. Insbesondere sollen Schadstoffbelastungen

vermieden und gegebenenfalls verringert werden. Unternehmen können die Einhaltung dieser Regeln überprüfen und zertifizieren lassen. Zuständig hierfür sind Institutionen, die bei GlobalGAP akkreditiert sind. In jedem Fall ist die Implementierung des GlobalGAP-Standards mit weitreichenden Folgen für die Betriebsorganisation verbunden, sie wird abschließend in einem Audit-Prozess geprüft.



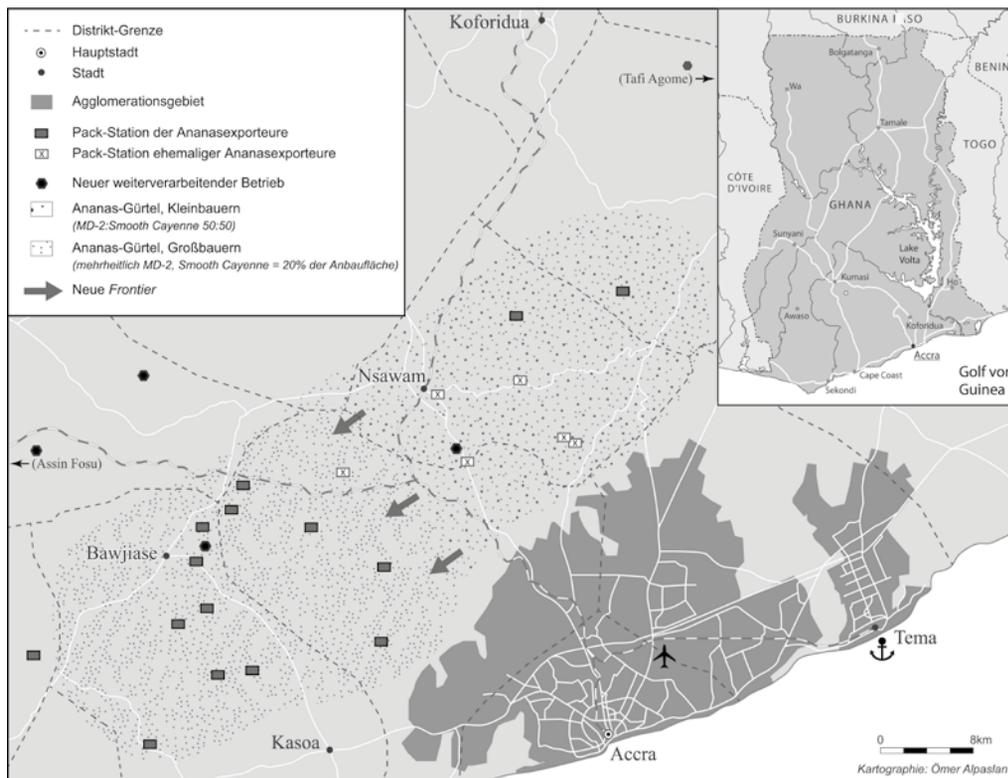
■ Abb. 3: Ananasfrüchte auf einem Markt in Accra, Ghana (Foto: ist).



GlobalGAP ist also eine im Globalen Norden entwickelte Institution: ein handlungsleitendes Set von Regeln, das sowohl bei Konsument*innen wie bei Supermärkten Unsicherheiten in Bezug auf Schadstoffbelastungen von Obst und Gemüse verringern soll. Doch am anderen Ende der Wertschöpfungskette haben diese Regeln zu neuen Unsicherheiten geführt, wie Untersuchungen in Kenia zeigen.⁴ Hier konnten sich Supermärkte die höhere Produktqualität zu einem unveränderten Preis erkaufen, weil sie das Zertifizierungsverfahren an andere Glieder der Wertschöpfungskette delegieren konnten. Gleichzeitig war es – weil GlobalGAP nach 2007 weltweit eine immer schnellere Verbreitung fand – für viele kenianische Landwirte zunehmend ungewiss, ob sie ihre Produkte weiterhin in die EU exportieren könnten und wer für die Kosten der Zertifizierung aufkommen würde. Zudem erschien es fraglich, ob sich diese Investition in einem Markt, der ohnehin schon durch starke Preisschwankungen gekennzeichnet war, auch lohnen würde. Für Produzent*innen im Globalen Süden entstanden somit neue Kosten und organisatorische Unwägbarkeiten.

Eine neue Züchtung revolutioniert den Ananas-Markt

Ein weiteres, von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördertes wirtschaftsgeographisches Forschungsprojekt befasste sich mit dem Export von frischen Ananas aus Ghana in die EU. Mitte der 2000er Jahre galt das westafrikanische Land als eines der aufstrebenden Länder im globalen Ananas-Handel. Der Anbau konzentrierte sich auf eine Region nördlich der Hauptstadt Accra und wurde größtenteils von Kleinbäuer*innen betrieben, die wiederum



■ Abb. 4: Alte und neue Anbaugelände im Ananas-Gürtel Ghanas (Quelle: Stefan Ouma 2020).

an Exporteure verkauft (Abb. 4). Einige Exporteure besaßen auch eigene Farmen. In beiden Fällen belieferten afrikanische Exporteure Importeure in Europa, die ihrerseits den Einzelhandel belieferten.

Bereits 1996 hatten sich die Wettbewerbsbedingungen auf dem globalen Ananasmarkt maßgeblich geändert. Auslöser war der Konzern Fresh Del Monte Produce, ein in den USA ansässiger, transnational organisierter Produzent, Vertreiber und Vermarkter von frischem Obst, Gemüse und anderen Produkten. In jenem Jahr brachte das Unternehmen eine Designer-Ananas auf den Markt, die von einigen als das wohl wertvollste neue Fruchtprodukt der Welt bezeichnet wurde: die *Gold Extra Sweet Ananas*, oft kryptisch MD2 genannt.

MD2 stammte aus den Konzernlabors auf Hawaii und war für die kapitalintensive Produktion auf den Flachebenen Costa Ricas optimiert worden. Die Frucht sollte den Markt zum Vorteil des Agrokonzerns verändern und die geographische Reichweite seiner Absatzmärkte neu definieren. Bis Mitte der 1990er Jahre war der Weltmarkt klar aufgeteilt: Südostasiatische Länder wie Thailand, die Philippinen und später Indonesien waren die Zentren des Ananasanbaus für die Weiterverarbeitung zu Säften und Konserven. Mittelamerikanische Exporteure, insbesondere Costa Rica, belieferten hauptsächlich den US-Markt mit der Sorte Champaka. Der europäische Markt für frische Ananas wurde weitgehend von Côte d'Ivoire (Elfenbeinküste) und Ghana mit der Sorte *Smooth Cayenne* beherrscht. MD2 wurde von Del Monte mit vielen Vorteilen be-

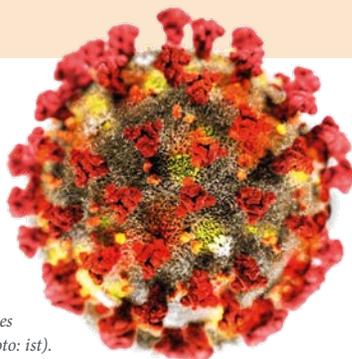
worben, vor allem mit längerer Haltbarkeit, goldener Farbe und einem süßen Geschmack. Die Sorte konnte zudem leicht aus Lateinamerika auf dem Seeweg nach Nordamerika und Europa transportiert werden. Dadurch wurde der Wettbewerbsvorteil von Côte d'Ivoire und Ghana gefährdet, der bis dahin aufgrund der räumlichen Nähe zu Europa bestand. Wie viele andere transnationale Agrarunternehmen verfügte Del Monte über eine beträchtliche Lieferkettenmacht und kontrollierte die gesamte Fruchtkette, bestehend aus Forschung, Produktion, Logistik sowie Distributions- und Reifungszentren. Für die Logistik konnte Del Monte auf eigene Kühlcontainer, Spezialschiffe und Speditionsunternehmen zurückgreifen.

MD2 ist also als Produkt einer Strategie zu sehen, mit der ein Unternehmen die Machtpotenziale seiner vertikalen Integration dazu verwendet hat, um sich mehr Marktanteile zu sichern. Das Ziel war es, auf diese Weise Erwartungs- und Renditehorizonte für Anleger*innen, für das Management und für Beschäftigte zu stabilisieren. Auch das Verkaufsargument bestand darin, Abnehmer*innen mehr Sicherheit in Bezug auf die Qualität des gehandelten Produktes zu versprechen – nach dem Motto „Alles aus einem Guss“. Für Kleinbäuer*innen und Exporteure in Ghana stellte jedoch die Flutung des Marktes mit MD2 einen externen Schock dar, der zu neuen Unsicherheiten führte. Sie blieben auf ihren traditionellen Ananas-Varianten zunehmend sitzen. Um die eigene Produktion auf MD2 umstellen zu können, war es erforderlich, über langwierige *Trial and Error*-Prozesse den richtigen Umgang mit der Designer-Ananas zu erlernen. Viele Ex-

Die Covid-19-Pandemie: Externalisierung in der Krise

Die Covid-19-Krise hat im Globalen Norden mittlerweile bewirkt, dass bisherige – vermeintliche – Sicherheiten zerbrochen sind. Massive wirtschaftliche Einbrüche, ein drohender Kollaps der Gesundheitssysteme, Ausgangssperren und ein radikaler Verzicht sind Erfahrungen, die bisher eher im Globalen Süden verortet wurden. Gleichzeitig hat die Pandemie das bekannte systemische Ungleichgewicht verschärft. In Deutschland wurden viele Menschen über Kurzarbeitergeld und andere Transfermechanismen vor den schlimmsten wirtschaftlichen Folgen bewahrt. Diese Instrumente stehen aber bei weitem nicht jedem Staat zur Verfügung, und auch nicht jeder Staat, der fiskalisch dazu in der Lage wäre, würde seine Ressourcen in der gleichen Weise mobilisieren. Zudem konnten Deutschland und einige andere Staaten des Globalen Nordens eigene Impfstoffe entwickeln.

Die so generierten neuen Sicherheiten sind jedoch nicht global erfahrbar. Der breitenwirksame Zugang zu COVID-19-Impfstoffen wird unter anderem deshalb erschwert oder sogar verhindert, weil zahlreiche Länder des Nordens am Patentschutz festhalten, obwohl das TRIPS-Rahmenwerk der Welthandelsorganisation WTO Ausnahmeregelungen vorsieht. Andererseits ist schon heute klar erkennbar: Ohne einen derartigen Zugang wird es auch für den Globalen Norden keinen dauerhaften Schutz vor dem Coronavirus SARS-Cov-2 und seinen Varianten geben. Wie es aussieht, sind die von dem Soziologen Stefan Lessenich beschriebenen Mechanismen der Externalisierung, die dieser SPEKTRUM-Beitrag an Beispielen aus der Agrarwirtschaft illustriert, durch die Pandemie erstmals in ihren Grundfesten infrage gestellt worden.



■ Abb. 5:
3D-Darstellung des
Corona-Virus (Foto: ist).

porture und Bäuer*innen, die sich den Umstieg auf MD2 nicht leisten konnten, schieden aus dem Ananasgeschäft aus. Während es in den späten 1990er Jahren zwischen 50 und 70 Exportunternehmen gab und zu diesem Zeitpunkt etwa 40 Prozent der aus Ghana exportierten Ananas von Kleinbäuer*innen produziert wurden, sanken diese Zahlen bis 2009 drastisch.

2011 wurde der Markt von nur mehr 14 Exporteuren bespielt. Die Ananasausfuhren Ghanas blieben nur deswegen relativ konstant, weil die Großbetriebe, denen die Umstellung gelang, die wegbrechenden *Smooth Cayenne*-Exporte ausglich. Die überlebenden Exporteure breiteten sich mit ihren MD2-Pflanzungen in einem neuen Gebiet westlich von Accra aus, wo sie große Landstriche für eine zunehmend mechanisierte Form des Ananas-Anbaus erschlossen (Abb. 4). Dies führte dort wiederum dazu, dass viele migrantische (nicht-autochtone) Kleinbäuer*innen

mit schwachen Landrechten den Zugang zu Land verloren. Auch hier sahen sich Personen, die keine angestammten Landrechte haben, infolge der Ausweitung des MD2-Anbaubereichs plötzlich mit neuen Unsicherheiten konfrontiert.⁵

Globale Investitionen in landwirtschaftliche Flächen

In einem jüngeren DFG-finanzierten Projekt hat der Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie an der Universität Bayreuth untersucht, welchen Einfluss globale Investitionsketten auf Landmärkte in Tansania und Neuseeland haben.⁶ Getragen werden solche Ketten größtenteils von Vermögensverwaltern, insbesondere von Private Equity-Unternehmen, die Gelder von Stiftungen, Pensionsfonds, reichen Einzelpersonen und anderen Quellen in Agrarland und dazugehörige landwirtschaftliche Betriebe investieren (Abb. 6). Im Zuge der Finanzkrise von 2007 bis 2008 wurde Landwirtschaft zur neuen Anlageklasse erkoren. Aufgrund einer steigenden Weltbevölkerung und eines interessanten Risiko-Ertragsprofils galten Agrarflächen und Landwirtschaft als ein sicherer Anlagehafen. Akteure der Finanzwirtschaft kultivierten geschickt das Narrativ von Land(-wirtschaft) als neuer alternativer Anlageklasse und schickten sich an, diese zu institutionalisieren und zu professionalisieren, um Unsicherheiten für mögliche Investoren zu reduzieren. Denn für viele Investoren stellte Landwirtschaft keineswegs selbstverständlich ein sicheres Investment dar, wie 2014 ein Kapitalverwalter (*Asset Manager*) berichtete:

„Man muss ständig erklären und predigen: Landwirtschaft ist ein System mit extrem vielen Gleichungen und noch mehr Unbekannten. Das bedeutet, dass viele Entscheidungen unter Bedingungen der Unsicherheit getroffen werden. Man kann nie alle Faktoren zu 100 Prozent erfassen. Das ist nicht die industrielle Produktion. Und man hat eine Menge Volatilität, nicht nur in Bezug auf die Preise, mit denen man vielleicht zurechtkommt, sondern auch in Bezug auf die Erträge. Und diese multiplizieren sich gegenseitig, das heißt, die Volatilität der Renditen wird x-mal die Volatilität der Preise sein. Das müssen Anleger verstehen.“

Die Stabilisierung der neuen Anlageklasse „Agrar“ über soziale, kommunikative und institutionelle Investitionen der Finanzbranche hat letztendlich bewirkt, dass sich vermehrt institutionelle Investoren (*equity-driven investors*) in die Landwirtschaft wagen. Dieser Zusammenhang lässt sich am Beispiel von Neuseeland deutlich machen, einem der globalen „Hot Spots“ für Private

LITERATURTIPPS

Teile dieses SPEKTRUM-Beitrags sind erschienen in: S. Ouma: Waren, Wissen und „Raum“: Die Dunklen Seiten globaler Lieferketten im Lebensmittelhandel, in: N. Baur et al. (eds.): Waren – Wissen – Raum. Interdependenz von Produktion, Markt und Konsum in Lebensmittelwarenkette. Wiesbaden 2020, 486-516.

Weitere Studien:

T. J. Klinge: Foreign investments in New Zealand's agricultural sector and their regulation, 2001–2017. *Globalizations* (2020). DOI: 10.1080/14747731.2020.1795427.

S. Ouma: Agriculture as Financial Asset: Global Money and the Making of Institutional Landscapes. Newcastle 2020. Open Access: <https://www.agendapub.com/books/95/farming-as-financial-asset>

A. Vorbrugg, S. Ouma: Transformationen des Ländlichen: Land und Landwirtschaft in der Globalen Marktgesellschaft, in: H. Gebhardt et al. (eds.): *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie*. Berlin 2020, 905-91.

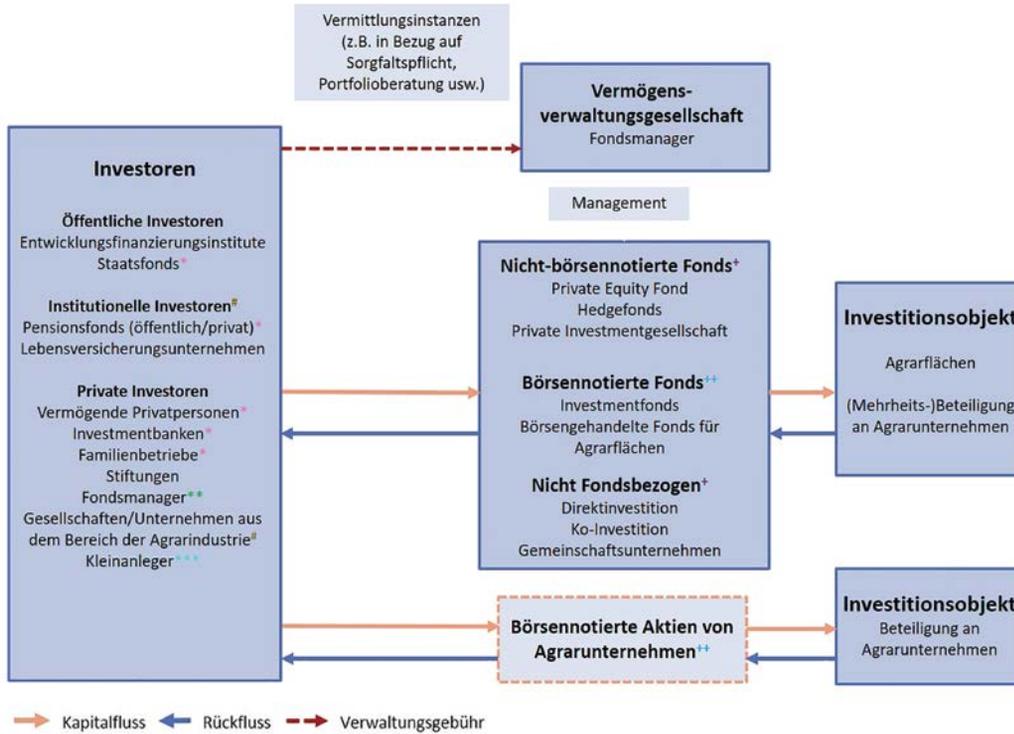


Abb. 6: Kanäle für Investitionen in Agrarland und landwirtschaftliche Betriebe (Grafik: Stefan Ouma).

- 1 S. Lessenich (2017): Neben uns die Sintflut. Die Externalisierungsgesellschaft und ihr Preis. 4. Auflage, München – Berlin.
- 2 Ebd., 23-25.
- 3 Ebd. 24.
- 4 S. Ouma (2010): Global Standards, Local Realities: Private Agrifood Governance and the Restructuring of the Kenyan Horticulture Industry. *Economic Geography* 86 (2), 197-222.
- 5 Zu dieser Entwicklung siehe auch: C. B. Barrett et al.: Smallholder Participation in Contract Farming: Comparative Evidence from Five Countries. In: *World Development* (2012), 40 (4), 715-730. DOI: 10.1016/j.worlddev.2011.09.006.
- 6 S. Ouma (2020): Agriculture as Financial Asset, siehe Literaturtipps.
- 7 T. J. Klinge: Foreign investments in New Zealand's agricultural sector and their regulation, 2001–2017. Siehe Literaturtipps. – T. Klinge, S. Ouma: Zur nationalen Regulierung globaler Agrarinvestitionen: Das Beispiel Aotearoa Neuseeland, in: Michael Mießner, Matthias Naumann (eds.): *Kritische Geographien ländlicher Entwicklung. Globale Transformation und lokale Herausforderungen*. Münster 2019, 161-176.

* investieren ggf. direkt in Agrarfläche/Agrarunternehmen mit Hilfe von Vermittlungsinstanzen ** investieren das eigene Geld in Hedgefonds oder private Aktienfonds um Anreize anzugleichen *** können nur auf börsennotierte Vehikel zugreifen (organisierter Kapitalmarkt) + gehören zum grauen/nicht-organisierten Kapitalmarkt ++ gehören zum organisierten Kapitalmarkt # investieren ggf. direkt in landwirtschaftliche Produktion durch nicht-börsennotierte, private Agrarunternehmen

te Equity-Investitionen in Land und landwirtschaftliche Betriebe.⁷ In Abb. 7 wird gut sichtbar, wie insbesondere Investments von institutionellen Investoren – beispielsweise von Pensionsfonds – seit 2010 angestiegen sind. Diese Investitionen peilen landwirtschaftliche Betriebe ausschließlich als Renditeobjekt an.

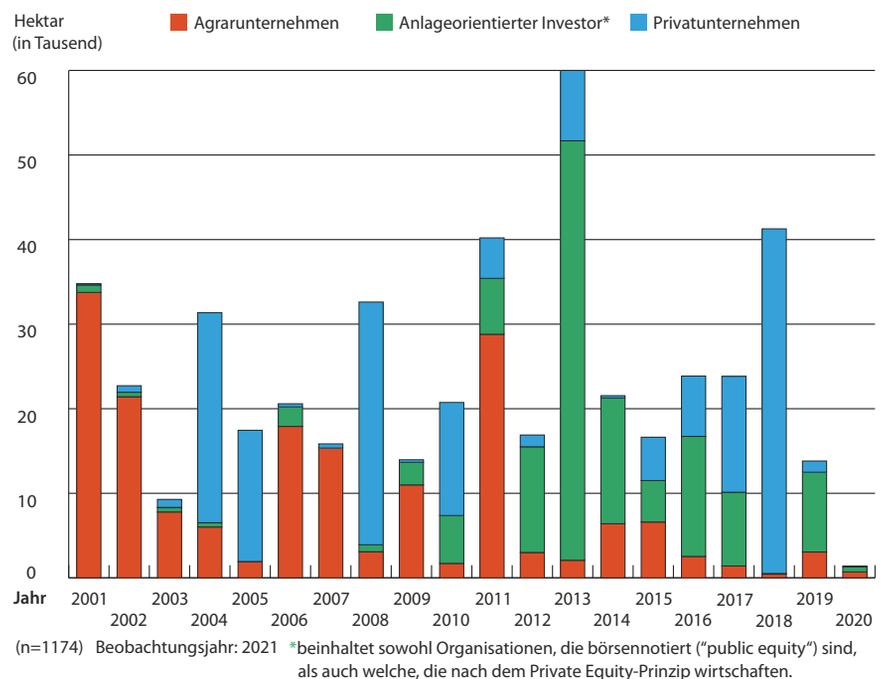
In der Stabilisierung von Landwirtschaft als einer alternativen Anlageklasse drückt sich die Tatsache aus, dass sich die von den Investoren in diesem Bereich wahrgenommenen Risiken verringert haben. Diese Entwicklung setzt auf der einen Seite neue Kapitalströme frei, die angelegt werden wollen. Auf der anderen Seite führt sie nicht selten zu neuen Konzentrationsprozessen bei den Besitzverhältnissen und zu Preissteigerungen auf Landmärkten. Hiervon profitieren Landwirte, die bereits Landeigentümer sind, weil dadurch ihr Kapitalwert gesteigert wird. Für Landwirte ohne Grundbesitz erzeugt diese Dynamik hingegen neue Unsicherheiten in Bezug auf den Zugang und den Preis von Agrarflächen. Ausländische Investoren können zwar nicht allein für diese Entwicklungen verantwortlich gemacht, haben jedoch mitunter einen Anteil daran.

Fazit

Diese drei Beispiele aus der wirtschaftsgeographischen Forschung zeigen: Die Produktion von Sicher-

heit für bestimmte Gruppen an bestimmten Orten kann in der Weltwirtschaft mit der Produktion von Unsicherheit für andere Gruppen an anderen Orten einhergehen. Globale Liefer- und Investitionsketten sind die Transmissionsriemen für die räumliche Umverteilung von Sicherheiten und Unsicherheiten. Deshalb verdienen sie eine besondere wissenschaftliche Aufmerksamkeit.

Abb. 7: Entwicklung der Investitionen in Agrarland in Neuseeland nach Investorentypen, 2001- 2020 (Quelle: Bearbeitung durch Sebastian de la Serna, LS Wirtschaftsgeographie, Univ. Bayreuth, basierend auf Daten des Overseas Investment Office und CAFCA).





■ Alexander Brink
Frank Esselmann

Corporate Digital Responsibility

Wie die Kommunikation über Werte Vertrauen in die digitale Transformation sichert

■ Kommunikationsprozesse, welche die Interessen und Sichtweisen der Menschen in den Mittelpunkt stellen, erweisen sich immer mehr als notwendige Voraussetzung, um gesellschaftliche Unsicherheit angesichts der zunehmenden Digitalisierung zu verringern und Vertrauen zu schaffen (Foto: ist).

Die Auseinandersetzung mit Verantwortlichkeitsaspekten der Digitalisierung, kurz Corporate Digital Responsibility (CDR), hat Hochkonjunktur. Bereits im Juli 2016 haben die Autoren dieses SPEKTRUM-Beitrags einige Thesen zur Zukunft dieser Thematik vorgestellt.¹ Maßgeblich waren dafür die Parallelen in der Entwicklung von Corporate Responsibility (CR) und CDR. Im Folgenden soll es darum gehen, diese Überlegungen zur CDR weiterzuführen – und zwar insbesondere unter dem Aspekt, wie Unternehmen der heute weit verbreiteten Unsicherheit begegnen können, die durch die digitale Transformation und ihre Folgen ausgelöst wird. Im Zentrum dieser Überlegungen stehen Prozesse der Kommunikation, die sowohl unter wissenschaftlichen wie unter ethischen Aspekten umsichtig konzipiert und ausgestaltet werden sollten.

„Ethik erweist sich immer stärker als ein Instrument zum Umgang mit Ungewissheit und Unsicherheit.“

Angesichts der höchst dynamischen Entwicklung der Digitalisierung und den besonderen Herausforderungen, die in ihren Ambivalenzen liegen, haben sich die 2016 formulierten Anforderungen an die CDR von Unternehmen bestätigt. Unternehmen sollten

- sich aktiv mit den Wertekonflikten rund um die Digitalisierung auseinandersetzen und Konflikte zwischen Geschäft und Gesellschaft im Rahmen einer *Shared-Value-Strategie* überwinden,
- für eine erfolgreiche Umsetzung die gesamte Wertschöpfungskette aus einer Multistakeholder-Perspektive betrachten und
- die im CR-Management bewährten Instrumente auch für viele CDR-Herausforderungen erfolgreich einsetzen.

In der Pandemie sind die Relevanz und Dringlichkeit der Aufgaben, die aus der Digitalisierung für Unternehmen und die Gesellschaft insgesamt hervorgehen, verschärft hervorgetreten. Mangelnde Akzeptanz und Nutzung digitaler Instrumente wie Tracing-Apps, unzureichend geregelte Sicherheitsaspekte von Homeschooling-Lösungen oder ethische Probleme bei der Verwertung sensibler Informationen zur Priorisierung von Risikogruppen haben beispielhaft deutlich gemacht, wie wichtig Transparenz, Vertrauen und ein möglichst breiter Konsens in Wertefragen der Digitalisierung sind. Der hippokratische Eid, Gutes zu tun und Schlechtes zu vermeiden, erfordert den Übergang in eine neue, digitale Verantwortungsethik.

Wertefragen der Digitalisierung bestimmen die Agenda

Die Potentiale und Gefahren der Digitalisierung haben zu einer schleichenden Verunsicherung in der Gesellschaft beigetragen und das Misstrauen gestärkt. Kaum ein Tag vergeht ohne kritische Berichte über Cyberattacken, Datenverluste, Sicherheitslücken, Deep Fakes oder den missbräuchlichen Einsatz Künstlicher Intelligenz. Andererseits aber sind Prozesse der Gewinnung, Analyse, Verwertung und Verbreitung von Daten mittlerweile ein integraler Bestandteil der Geschäftstätigkeit der meisten Unternehmen. Diese sehen sich daher gedrängt, zu ihrem Umgang mit Daten und zu möglichen Gefahren im Zusammenhang mit der Digitalisierung öffentlich Stellung zu beziehen.

Regulative Aktivitäten der Politik verlangen von Unternehmen schon heute die Einhaltung hoher Standards: die Datenschutzgrundverordnung (Mai 2018), die Leitlinie der von der EU-Kommission eingesetzten hochrangigen Expertengruppe für Künstliche Intelligenz (Dezember 2018), das Gutachten der Datenethikkommission der Bundesregierung (Oktober 2019) und jüngst der EU-Rechtsrahmen für Künstliche Intelligenz vom April 2021² – um nur einige Beispiele zu nennen. Auf dem Digitalgipfel 2019, der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Plattform für den Austausch von Politik und Unternehmen, waren europäische Werte das fast dominierende Thema.³ Die Wirtschaft hat auf diese Herausforderungen mit zahlreichen Initiativen und Projekten reagiert, wie etwa der AG Ethik der „Initiative D21 – Netzwerk für die digitale Gesellschaft“, dem Projekt „Ethik der Algorithmen“ der Bertelsmann Stiftung, der „Charta digitale Vernetzung“ oder

■ Abb. 1: Screenshot der Webseite <https://cdr-initiative.de/> vom 26.09.2021.



dem „econsense-Blueprint“ zur Umsetzung digitaler Verantwortung in Unternehmen.

Im Zentrum aller Auseinandersetzungen um die Potentiale der Digitalisierung steht heute – wie schon 2016 prognostiziert – die Vereinbarkeit von Geschäft und Gesellschaft, das *Shared-Value-Prinzip*. Zwei Initiativen, in denen Politik und Unternehmen eng an dem Thema Corporate Digital Responsibility (CDR) zusammenarbeiten, sind klare Anzeichen dafür, wie ernst den Akteuren diese gemeinsame Zielvorstellung ist: zum einen der jüngst entwickelte CDR-Award unter Schirmherrschaft dreier Ministerien der Bayerischen Staatsregierung,⁴ zum anderen die CDR-Initiative des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz.⁵

Die CDR-Initiative des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz

Kodizes sind schriftlich fixierte Sollensvorschriften oder freiwillige Selbstverpflichtungen, an die sich sowohl Institutionen wie auch Individuen binden können. Sie loten in kritischen Fällen verschiedene Handlungsoptionen aus. Damit reduzieren sie Unsicherheiten und geben Entscheidungsträgern in ambivalenten Situationen eine Hilfestellung. Prinzipien sollen Orientierung geben und Unternehmen dabei unterstützen, ihre betrieblichen Abläufe dauerhaft und verlässlich an den Anforderungen der CDR auszurichten.

Prof. Dr. Dr. Alexander Brink, Professor für Wirtschafts- und Unternehmensethik an der Universität Bayreuth, und Dr. Frank Esselmann von der concern GmbH haben die Erarbeitung dieser Leitlinien wissenschaftlich begleitet. Ein

wichtiger Ansatzpunkt waren Wertekonflikte rund um die Digitalisierung zwischen Geschäft und Gesellschaft, die im Rahmen einer Shared-Value-Strategie thematisiert wurden. Dabei wurde die gesamte Wertschöpfungskette aus einer Multistakeholder-Perspektive – fokussiert auf Politik, Wirtschaft und Wissenschaft – betrachtet, wobei der Schwerpunkt auf den Business-Consumer-Beziehungen (B2C) lag. In die Richtlinien hat nicht zuletzt auch der Vorschlag einer freiwilligen Selbstverpflichtung und eines daran angeschlossenen Reportings Eingang gefunden. Hier handelt es sich um bewährte Instrumente des CR-Managements, wie sie beispielsweise auch im Rahmen des UN Global Compacts genutzt werden.

<https://cdr-initiative.de/kodex>

CDR erfordert eine ganzheitliche Betrachtung

Grundlage der Digitalisierung in Unternehmen ist die Datenerfassung und Datenhaltung, die sich durch alle Phasen der Wertschöpfungskette zieht – bis zum Kontakt mit den Verbraucher*innen. Daher haben Unternehmen schon in der ersten deutschlandweiten Unternehmensbefragung zum Thema CDR die Betrachtung der *gesamten Wertschöpfungskette* als unabdingbare technische und ethische

Herausforderung identifiziert.⁶ Ansätze zu präzisierenden Systematiken finden sich beispielsweise in den definierten Handlungsfeldern der CDR-Initiative oder in den Building Bloxx des Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW).⁷

CR-Instrumente bewähren sich – aber es gibt auch Aufholbedarf

Eine erste Bestandsaufnahme zeigt: Die auf dem Gebiet der Corporate Responsibility (CR) entwickelten Instrumente der Problemidentifikation lassen sich gut auf neue, durch die Digitalisierung entstandene Herausforderungen übertragen. Ausgehend von etablierten Erkenntnissen zur CR wird speziell im Hinblick auf die Corporate Responsibility (CDR) intensiv an Materialitätsanalysen, Risikoklassifikationen, Siegeln, Berichtsformaten, Kodizes oder der Governance von Innovationsprozessen gearbeitet. Defizite gibt es – wie schon bei der CR – im Bereich der Impactmessung, die darauf abzielt, die Wirkungen der jeweiligen Instrumente und Maßnahmen möglichst präzise zu erfassen. Zudem stecken die Antworten auf manche Detailfragen noch in den Anfängen, zum Beispiel verbindliche begriffliche Definitionen (Taxonomie) oder die Einbeziehung der CDR in Vergütungs- und Anreizmodelle sowie in die Rekrutierung von Mitarbeiter*innen. Diese Themen werden aller Voraussicht nach in den kommenden Jahren zunehmend relevant.

Wie sieht die Entwicklung der nächsten Jahre aus?

Die Prognose aus dem Jahr 2016, dass die gesellschaftlichen Strömungen und Debatten die Akzeptanz seitens der Kund*innen und Verbraucher*innen maßgeblich formen werden, hat sich in vieler Hinsicht bestätigt. So geben in einer aktuellen Studie 70 Prozent der Verbraucher*innen an, dass sie die Verantwortungsübernahme seitens der Unternehmen als sehr wichtig oder wichtig bewerten; lediglich 32 Prozent sagen, dass der Umgang deutscher Unternehmen mit der Digitalisierung aktuell eher oder sehr verantwortungsvoll sei.⁸ Im weiteren Verlauf der Studie finden sich auch Erkenntnisse darüber, wo Verbraucher*innen den größten Handlungsbedarf sehen – nämlich in konkreten Maßnahmen wie hohen Daten- und Sicherheitsstandards, einem direkten Kontakt zu Mitarbeiter*innen oder besserer Transparenz in Sachen Vertrag und Datenschutz.

Vor diesem Hintergrund sollen die früheren Überlegungen hier um eine weitere These ergänzt werden: *Bei der Navigation durch die von der digitalen Transformation geprägten Unsicherheiten müssen Unternehmen die Verbraucher*innen stärker in den Blick nehmen.*⁹ Es wird eine zentrale Herausforderung der nächsten Jahre sein, Probleme, Diskussionen und vor allem auch Lösungen näher an die Verbraucher*innen zu bringen. Bislang ist dieser Dialog vielfach als fachlicher und technischer Spezialistendialog geführt worden. Auf diese Weise aber lässt er zu viele Potenziale für den Aufbau von Vertrauen und Akzeptanz ungenutzt. Zudem werden die Unternehmen zu wenig bei dem – von der digitalen Transformation gebotenen – Veränderungsprozess (*change process*) unterstützt, in dem die Sicht der Kund*innen und Verbraucher*innen elementar wichtig ist.

Digitalisierung – Ambivalenz und Unsicherheit sind eingebaut

Digitale Prozesse sind den Menschen von Natur aus erst einmal fremd. Sie sind weitgehend unsichtbar und nicht mit den Händen zu greifen, ihre binäre Logik ist schwer zugänglich, und es gibt in der früheren Menschheitsgeschichte keine analogen Vorgänge. Gleichzeitig aber kommen uns digitale Prozesse heute sehr nah. Sie erstrecken sich von externen, von digitalen Medien ausgehenden Reizen bis zur organischen Verschmelzung mit internen Reizen, wie sie mit digital gesteuerten Herzschrittmachern längst etabliert oder mit Neurochips angedacht ist. Dem-

gegenüber erleben die Menschen die klassischen Nachhaltigkeitsfragen, so komplex diese auch sind, als leichter beurteilbar. „Wieviel Geld oder Verzicht bin ich bereit, für den Klimaschutz zu investieren?“ Dies ist zwar eine in ihren Auswirkungen gravierende Frage, doch sie wird von den meisten Menschen so erlebt, dass sie sich relativ konsequent beantworten lässt. „Wieviel Informationen über meinen Körper und meine Psyche sollen meine Gesundheitsversorger über mich haben?“ – diese Frage bleibt für die Betroffenen im Grunde genommen unbeantwortbar. Umso bemerkenswerter ist es, dass Unternehmen und Politik in den letzten Jahren bei der Regelung der mit derartigen Herausforderungen verbundenen Werteabwägungen und -konflikten vorangekommen sind. Dabei erweist sich Ethik immer stärker als ein Instrument zum Umgang mit Ungewissheit und Unsicherheit.

Von der Ethik lernen

Ethik hilft mit Unsicherheit umzugehen. Jürgen Habermas hat den Diskurs ins Zentrum seiner Theorie des kommunikativen Handelns gestellt.¹⁰ In diesem Zusammenhang formuliert er das Universalisierungsprinzip wie folgt: „So muß jede gültige Norm der Bedingung genügen, daß die Folgen und Nebenwirkungen, die sich jeweils aus ihrer *allgemeinen* Befolgung für die Befriedigung der Interessen eines *jeden* Einzelnen (voraussichtlich) ergeben, von *allen* Betroffenen akzeptiert (und den Auswirkungen der bekannten alternativen Regelungsmöglichkeiten vorgezogen) werden können.“¹¹ Dieses Prinzip stärkt

LITERATURTIPPS

A. Winter, F. Esselmann, A. Brink, C. C. Germelmann: Menschenzentrierung als Ziel des Verbraucherschutzes im digitalen Kontext. Mit einem Higher Purpose in die praktische Umsetzung, in: S. Roth, H. Corsten (eds.): Handbuch Digitalisierung. München 2021 (im Erscheinen).

A. Brink: Digialethik, in: M. S. Abländer (ed.): Handbuch Wirtschaftsethik, 2. überarbeitete Auflage. Stuttgart 2021 (im Erscheinen).



■ Abb. 2: Offene interne Kommunikation in Unternehmen ist eine Voraussetzung für gelingende Kommunikation gegenüber externen Interessengruppen (Foto: ist).

gleichermaßen sowohl die Shared-Value- als auch die Multistakeholder-Perspektive. Es ist bei Habermas eingebettet in eine öffentliche Kommunikation über Werte, die Unsicherheit verringern, die Akzeptanz von Normen erhöhen und Vertrauen schaffen soll. In guter alter kantischer Tradition steht der Mensch im Zentrum seiner Ethik.

Gleichwohl ist das von Habermas vorgeschlagene Universalisierungsprinzip gerade im Kontext der digitalen Transformation auch kritisch zu sehen:

■ Schon der Bezug auf „voraussichtliche“ Folgen und Nebenwirkungen ist problematisch. Wie der britische Technikforscher David Collingridge herausgearbeitet hat, sind die Folgen einer technischen Entwicklung oftmals erst dann absehbar, wenn diese Entwicklung so weit fortgeschritten ist, dass ein Umsteuern kaum noch möglich ist.¹² Dieses „Collingridge-Dilemma“ gilt gerade auch für Innovationen im Bereich der Digitalisierung und der Künstlichen Intelligenz.

■ Das Universalisierungsprinzip verlangt in der von Habermas vorgeschlagenen Formulierung, dass „alle“ an einem Diskurs teilnehmen, die von einer Entscheidung potentiell betroffen sind. Gerade die Digitalisierung und ihre Folgen schließt aber nahezu alle Menschen dieser Welt ein. Es waren nicht zuletzt solche eher realitätsfremden Anforderungen an einen „idealen Diskurs“, an denen sich die Kritik an Habermas' Universalisierungsprinzip entzündete.

■ Die digitale Transformation stellt die Realitätsnähe dieses Prinzips noch in einer weiteren Hinsicht infrage. Es dominiert heute in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft eher ein von Interessen dominiertes *strategisches Handeln* und nicht ein *kommunikatives Handeln*, das sich an Verständlichkeit, Wahrheit, Richtigkeit und Wahrhaftigkeit orientieren würde. Daher wird der im kommunikativen Handeln angestrebte Konsens – verstanden als Kohärenz der von den Beteiligten vertretenen Überzeugungen – in der gelebten Praxis häufig durch einen verhandlungsbasierten oder beratenden Kompromiss ersetzt.¹³

■ Der von Habermas geforderte Diskurs, der die Gültigkeit von Normen begründen soll, verlangt von allen Beteiligten die Zurückstellung ihrer jeweiligen individuellen Interessen. Aber es ist umgekehrt gerade die persönliche Betroffenheit verschiedener Share- und Stakeholder, die im Rahmen der digitalen Transformation eine auf den Menschen fokussierte Kommunikation erforderlich macht.

Diese Bedenken gegenüber Habermas' Theorie des kommunikativen Handelns machen seinen Ansatz, Kommunikation in den Mittelpunkt der Ethik zu stellen, aber keineswegs obsolet. Im Gegenteil, dieser Ansatz kann sich gerade im Bereich der CDR als fruchtbar und erfolgversprechend erweisen. Dies gilt insbesondere dann, wenn von den Beteiligten eben keine „Neutralität“ erwartet wird, sondern wenn deren persönliche Betroffenheit den Ausgangs- und Anknüpfungspunkt für eine menschenzentrierte Kommunikation über neue digitale Technologien bildet. Verbraucher*innen, Kund*innen, Klient*innen, Bürger*innen, Patient*innen oder Bewohner*innen sollten ihre individuellen Sichtweisen, Interessen und auch Vorurteile in die nötigen Kommunikationsprozesse einbringen können. Prinzipien, Normen und Werte haben dabei oftmals die Funktion, diese Prozesse mit dem Ziel zu regulieren, gut begründete und weitgehend akzeptierte Kompromisse zu ermöglichen und genau dadurch wechselseitiges Vertrauen zu stärken. Der aus der CDR-Initiative des Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz hervorgegangene CDR-Kodex ist in diesem Zusammenhang ein gutes Beispiel.



Foto: ist.

Ein wichtiges Ziel dieser ethisch regulierten Prozesse muss es sein, unter den Bedingungen der Ambivalenz digitaler Technologien und des unauflösbaren Collingridge-Dilemmas die digitale Autonomie zu stärken. Kommunikation ist das geeignete Mittel, die konsequente Menschenzentrierung das zugrundeliegende Prinzip. Habermas fordert die „Anerkennung des Anderen in seiner Andersartigkeit“. Diese wechselseitige Anerkennung ist allerdings nur realisierbar, wenn ein hoher Grad von Transparenz gegeben ist. Im Rahmen der digitalen Transformation ist diese Voraussetzung sehr anspruchsvoll. Sie lässt sich aber realisieren, wie eine aktuelle Entwicklung aus Bayern – der Data Process Modeler – zeigt.¹⁴

AUTOREN

Prof. Dr. Dr. Alexander Brink ist Professor für Wirtschafts- und Unternehmensethik an der Universität Bayreuth. Seit 2021 leitet er hier das neugegründete Institut für Ethik und Management.



Frank Esselmann ist Partner bei der concern GmbH, einer Ausgründung der Universität Bayreuth, und als Unternehmensberater mit Projekten in den USA und Europa für Unternehmen verschiedener Branchen tätig.



Ein gutes Beispiel: Der Data Process Modeler ermöglicht Transparenz zu Technik und Werten

Der Data Process Modeler wurde im Auftrag von Bayern Innovativ, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, als Open Source-Lösung mit der Aufgabe entwickelt, Unternehmen dabei zu unterstützen, ihre Datenverarbeitung in Prozessen, Zielen und Wertefragen – von Sicherheit bis hin zu Autonomie und Menschenzentrierung – transparent zu machen. Die Lösung erlaubt eine mit Icons, Bildern und Videos unterstützte Darstellung, die beginnend mit einem einfachen Überblick fachlich bedarfsgerecht „auffaltbar“ in die Tiefe geht.

Der besondere Mehrwert des Ansatzes liegt darin, dass von betroffenen Laien über Stellvertreter bis zu Fachleuten alle Beteiligten die gleiche Informationsgrundlage haben. Wenn es beispielsweise um die Entwicklung digitaler Gesundheitsanwendungen geht, stehen Patient*innen, Ärzt*innen und Familienmitglieder sowie Expert*innen mit IT- und Gesundheitskompetenz die gleichen Informationen zur Verfügung. Der Data Process Modeler hat nachgewiesenermaßen einen hohen Nutzen für Kommunikation, Vertrauen und Akzeptanz.

<https://www.bayern-innovativ.de/seite/data-process-modeler>

Zwei Bedingungen für eine wirksame Kommunikation

Damit die Kommunikation mit den Verbraucher*innen gelingt, sind zwei Bedingungen besonders wichtig:

Kommunikation muss verständlich sein –

das bedeutet konkret, Unternehmen sollten

- den Spezialistenjargon sprachlich überarbeiten und
- eine bruchlose Kommunikation zwischen Spezialisten aller Abstufungen und allen Beteiligten gewährleisten.

Kommunikation muss erlernt werden –

das bedeutet konkret, Unternehmen sollten

- eine Strategie mit Materialien für eine *Customer Literacy* entwickeln,
- die Urteilsfähigkeit schärfen, die zwischen der gesellschaftlichen und der persönlichen Dimension klar unterscheidet,¹⁵
- eine gute, validierte Methodik der Bewertung digitaler Technologien unter wissenschaftlich gesicherter und ethisch begründeter Einbeziehung der betroffenen Personen und Interessengruppen entwickeln,
- Methoden zur Marktforschung, beispielsweise in Bezug auf den *Digital Moment of Truth*, für sich nutzen und auch die Methode der kritischen Ereignisse (*Critical Incident Technique, CIT*) einsetzen, um Verhaltensweisen zu identifizieren, welche die Ergebnisse von Kommunikationsprozessen positiv oder negativ beeinflussen.

Fazit

Die Geschwindigkeit der digitalen Transformation wird weiter zunehmen, ebenso Unsicherheiten, Konflikte und Ambivalenzen. Die Einbeziehung der Verbraucher*innen wird die Aufgabe der Zukunft sein, für die auch neue Instrumente entwickelt werden müssen. Es besteht Grund zur Zuversicht, dass in diesem Bereich große Fortschritte zu erwarten sind. Ob sie genügen, einer weiteren Polarisierung der Gesellschaft oder dem sich vergrößernden „Digital Divide“ entgegenzuwirken, bleibt zu hoffen.

- 1 F. Esselmann, A. Brink: Corporate Digital Responsibility. Den digitalen Wandel von Unternehmen und Gesellschaft erfolgreich gestalten. In: Spektrum. Das Wissenschaftsmagazin der Universität Bayreuth (2016) 12 (1), 38–41, und T. Cooper, J. Siu, K. Wei, in: Accenture (ed.): Corporate Digital Responsibility. Doing Well by Doing Good. London 2015.
- 2 EU (2021): Neue Vorschriften für künstliche Intelligenz – Fragen und Antworten. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/QANDA_21_1683
- 3 <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Dossier/digital-gipfel-2019.html> (30.09.2021)
- 4 <https://www.cdr-award.digital/> (30.09.2021)
- 5 Vgl. Infobox S. 72.
- 6 F. Esselmann, D. Golle, A. Brink (2020): Whitepaper Corporate Digital Responsibility. Garching. Online veröffentlicht unter: <https://www.bayern-innovativ.de/seite/corporate-digital-responsibility-cdr> (30.09.2021)
- 7 <https://www.cdr-building-bloxx.com/> (30.09.2021)
- 8 ConPolicy (2021): Corporate Digital Responsibility. Ergebnisse einer repräsentativen Verbraucherbefragung. Veröffentlicht unter <https://cdr-initiative.de/news/cdr-auf-dem-digital-gipfel-2020-digital-nachhaltiger-leben-2>
- 9 A. Winter, F. Esselmann, C. C. Germelmann (2021): Menschenzentrierung als Ziel des Verbraucherschutzes im digitalen Kontext, siehe Literaturtipps.
- 10 J. Habermas: Theorie kommunikativen Handelns. Suhrkamp, Frankfurt 1984.
- 11 J. Habermas: Moralbewusstsein und kommunikatives Handeln. Suhrkamp, Frankfurt 1983, 75 (Kursivierungen A.B. und F.E.).
- 12 D. Collingridge: The Social Control of Technology. New York 1980.
- 13 Vgl. grundlegend zur Digitalethik: A. Brink (2021): Digitalethik, siehe Literaturtipps.
- 14 Vgl. Infobox S. 75.
- 15 D. J. Solove: The Myth of the Privacy Paradox, in: George Washington Law Review (2020), Vol. 89, 1-42.

Flexibilität in Zeiten zunehmender Unsicherheit

Ein Plädoyer für den
Ausbau nachhaltiger und
flexibler Energiesysteme

■ *Windkraft wird zu einem steigenden Bedarf an Flexibilität in Energiesystemen führen (Foto: ist).*

Energie ist eine der wesentlichen Grundlagen für wirtschaftlichen Wohlstand, ja generell für unsere heutige Gesellschaft – einschließlich Bildung, Ernährung und Freizeitgestaltung. Die COVID-19-Pandemie, samt ihrer gravierenden ökonomischen und sozialen Folgen, hat vor Augen geführt, wie entscheidend eine verlässliche Energieversorgung in Krisenzeiten ist. Bereits innerhalb weniger Wochen nach Ausbruch der Pandemie kam es zu schweren wirtschaftlichen Einbrüchen, die schockartige Auswirkungen auf die Stromsysteme hatten – sowohl auf der Stromangebots- als auch auf der Stromnachfrageseite. Der allgemeine Stromverbrauch ging zurück, die Verbrauchsprofile in der Industrie und den Haushalten änderten sich, die Brennstoffpreise sanken. Gleichwohl gibt es erste Hinweise darauf, dass in vielen Ländern der Erde die Stromsysteme ohne weitreichende Ausfälle funktioniert haben.¹ Wenn man entsprechend die COVID-19-Pandemie als Stresstest für die Widerstandsfähigkeit der globalen Stromsysteme betrachtet, könnte man zu dem vorläufigen Schluss kommen: Insgesamt gesehen, haben die Stromsysteme gut funktioniert.

Dennoch wäre es ein Trugschluss zu denken, die Widerstandsfähigkeit unserer Stromsysteme sei so hoch, dass eine stabile und verlässliche Stromversorgung auch für die Zukunft ohne größere Systemveränderungen gewährleistet sei.² Denn bei genauerem Hinsehen treten eine ganze Reihe von Unsicherheitsfaktoren zutage: Die Umstellung von kohlenstoffdioxidreichen zu kohlenstoffdioxidarmen Systemen und ein wachsender Anteil erneuerbarer Energien machen, ungeachtet ihrer Bedeutung für den Umwelt- und Klimaschutz, den Betrieb von Stromsystemen tendenziell unsicherer. Die aus Windkraft und Photovoltaik gewonnenen Strommengen sind starken, oft unvorhersehbaren wetter- und klimabedingten Schwankungen unterworfen. Die physikalischen Gesetze, denen die Stromnetze unterliegen, verlangen aber, dass Stromangebot und -nachfrage im Gleichgewicht sein müssen: zu jeder einzelnen Millisekunde und an jedem einzelnen Ort im Stromnetz. Daher stellen die Schwankungen eine besondere Herausforderung dar: Es müssen technische Lösungen für den stabilen Betrieb künftiger „grüner“ Stromsysteme gefunden werden.

Die Kosten für ein hohes Maß an Energiesicherheit sind bereits gegenwärtig hoch. So belaufen sich beispielsweise die Kosten für Ausgleichsmaßnahmen in Deutschland regelmäßig auf über eine Milliarde Euro pro Jahr. Derartige Kosten werden oft direkt auf die Endverbraucher*innen umgelegt, so dass sie

eine Herausforderung für die allgemeine Bezahlbarkeit von Strom darstellen. Die Erfahrungen mit der COVID-19-Pandemie und der daraus resultierenden Wirtschaftskrise, aber auch die Herausforderungen durch den Klimawandel zeigen die Richtung an, in die sich die Entwicklung der Energiesysteme künftig bewegen sollte: Der Schlüsselbegriff lautet „Flexibilisierung“.

Die Energieversorgung verlässlich(er) machen

Die Flexibilität eines Stromsystems ist vereinfacht definiert ihre Fähigkeit, auf Veränderungen von Angebot und Nachfrage so zu reagieren, dass ein räumliches und zeitliches Gleichgewicht im jeweils zugrunde liegenden Stromnetz gewährleistet bleibt. Nur wenn ein Stromsystem hierzu in der Lage ist, besitzt es die nötige Stabilität und Widerstandsfähigkeit (Resilienz). Deshalb sind weltweit öffentliche und private Investitionen in die Flexibilisierung der Stromsysteme dringend geboten. Sie haben den doppelten Vorteil, dass die in Politik und Gesellschaft angestrebten Energie- und Klimaziele (schneller) erreicht werden und die Stromsysteme zur Sicherung eines langfristigen Wirtschaftswachstums beitragen können.

„Weltweit sind öffentliche und private Investitionen in die Flexibilisierung der Stromsysteme dringend geboten.“

Für die katastrophalen Folgen flächendeckender Stromausfälle gibt es aus der jüngeren Vergangenheit zahlreiche Beispiele. Im Jahr 2012 waren infolge zweier großer Stromausfälle in Indien rund 600 Millionen Menschen ohne Strom. 2019 waren Argentinien, Paraguay und Uruguay von massiven kaskadenartigen Stromausfällen betroffen. Überall kam es in der Folge zu massiven Kostensteigerungen. Sie wurden nicht allein durch notwendige Netzeingriffe und die direkte Wiederherstellung der Versorgungssicherheit verursacht, sondern auch zum Beispiel durch Reparaturarbeiten an Produktionsanlagen von Industrieunternehmen. In den meisten Ländern werden diese Kosten insbesondere auch an Privathaushalte weitergegeben, sodass die Gefahr von sogenannte Energiearmut steigt. Die wissenschaftliche Literatur verweist in diesem Zusammenhang immer wieder auf die zentrale Bedeutung eines in sozialer Hinsicht verantwortungsbewussten Governance-Rahmens für technologisch hochentwickelte Stromsysteme. Ge-

AUTOR



Dr. Martin Weibelzahl ist Habilitand an der Rechts- und Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Bayreuth und leitender Mitarbeiter der Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (© B. Seitz).

LITERATURTIPPS

S. Halbrügge et al.: How did the German and other European electricity systems react to the COVID-19 pandemic? Applied Energy (2021), 285, 116370. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116370.

R. J. Heffron et al.: The role of flexibility in the light of the COVID-19 pandemic and beyond: Contributing to a sustainable and resilient energy future in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2021), 140, 110743. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110743.

Operations Research

Das Gebiet des Operations Research, kurz OR, beschäftigt sich seit etwa einem Jahrhundert insbesondere mit der Entwicklung und dem Einsatz von Modellen und Methoden zur Lösung von komplexen Realweltproblemen. Damit unterstützt OR beispielsweise Entscheidungsprozesse von Unternehmen oder politisch Verantwortlichen. OR verwendet insbesondere Ansätze aus der angewandten Mathematik, aus den Wirtschaftswissenschaften und aus der Informatik.

Im Zuge der Energiewende muss eine Vielzahl an komplexen kurz- und langfristigen Entscheidungen getroffen werden, um Wirtschaft und Gesellschaft schnell zu dekarbonisieren und dabei eine weiterhin hohe Versorgungssicherheit sowie die Bezahlbarkeit von Strom sicherzustellen. Hierbei kann das interdisziplinäre Feld des OR wichtige Unterstützung mittels quantitativer Modelle liefern und beispielsweise Entscheidungsalternativen vergleichbar machen. Unsicherheiten und Risiken können dabei teils explizit abgebildet und auf diese Weise aktiv in eine Entscheidungsfindung einbezogen werden.

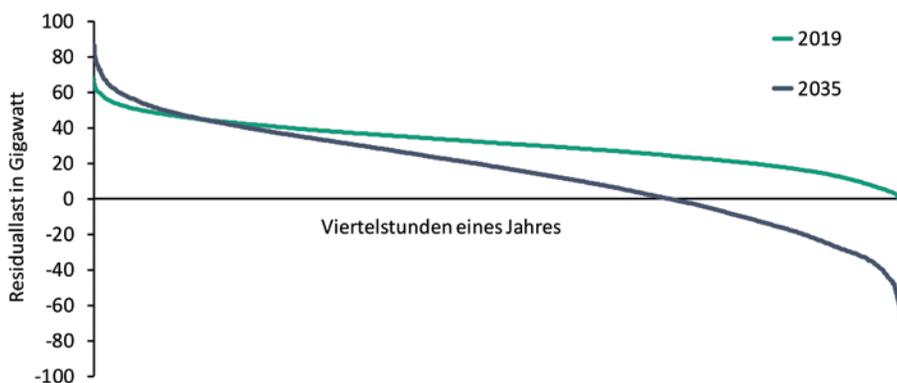
setze, regulatorische Vorschriften und andere Regeln müssen die richtigen Anreize setzen, um die Widerstandsfähigkeit von Stromsystemen zu stärken. Dazu zählen zunächst Anreize für den stetigen Ausbau, zum Beispiel von Speichertechnologien. Aber auch andere Optionen, mit denen Stromsysteme auf die – durch die verstärkte Einspeisung erneuerbarer Energien verursachte – Variabilität auf der Angebotsseite flexibel reagieren können, müssen ausgelotet werden.

Es lassen sich fünf wichtige technische Flexibilitätsoptionen unterscheiden, die in künftigen Stromsystemen weiterentwickelt werden müssen:³

- Angebotsseitige Flexibilität, beispielsweise durch hocheffiziente und moderne Gaskraftwerke
- Übertragungsflexibilität durch einen abgestimmten Ausbau des Stromnetzes
- Nachfrageseitige Flexibilität, insbesondere durch eine gezielte Steuerung von Industrieprozessen
- Intersektorale Flexibilität durch die Verknüpfung des Stromsektors mit anderen Sektoren wie Mobilität oder Wärme
- Speicherflexibilität, beispielsweise durch neue Batterietechnologien

In vielen Ländern wird die durch erneuerbare Energien bedingte Nachfrage nach Flexibilität zusätzlich durch den Ausstieg aus konventionellen Kraftwerken angetrieben. In Deutschland stellen Kohlekraftwerke derzeit noch einen großen Teil der notwendigen Flexibilität des Energiesystems auf der Angebotsseite bereit und können einen Beitrag leisten, Netzengpässe zu beheben. Darüber hinaus lässt die fortschreitende Elektrifizierung in Bereichen, die traditionell auf fossilen Brennstoffen basieren, wie etwa der Mobilitätssektor, die Stromnachfrage steigen und erfordert einen zusätzlichen Ausbau an volatilen erneuerbaren Energien.⁴

■ Abb. 1: Dauerlinien der Residuallast in den Jahren 2019 und 2035 für Deutschland in Anlehnung an Buhl et al. (2021)⁵ (Grafik: Martin Weibelzahl).



Vor diesem Hintergrund prognostizieren die europäischen Übertragungsnetzbetreiber einen steigenden Flexibilitätsbedarf für die kommenden Jahre. In der Forschung spricht man von einer „Flexibilitätslücke“, die sich bereits heute abzeichnet. In Abb. 1 ist hierzu die Residuallast für Deutschland im Jahr 2019 und im Jahr 2035 dargestellt. Die Residuallast beschreibt die Differenz zwischen dem Stromverbrauch und der entsprechenden Erzeugung aus volatilen erneuerbaren Energien und kann als ein Maß für den Ausgleichsbedarf angesehen werden, der durch die oben beschriebenen Flexibilitätsoptionen gestillt werden muss. Die in Abb. 1 gezeigten Residuallastveränderungen zwischen 2019 und 2035 unterstreichen dabei den steigenden Flexibilitätsbedarf in den nächsten Jahrzehnten.⁵

Diese Herausforderung muss seitens der Politik auf nationaler, europäischer und globaler Ebene gezielt mit neuen Konzepten und Maßnahmen für den Flexibilitätsausbau angegangen werden – in Analogie zu den Zielen für den Ausbau erneuerbarer Energien, wie sie beispielsweise in Deutschland bereits beschlossen wurden. Entscheidend ist hier auch die mittel- und langfristige Perspektive. Kurzfristige Mechanismen zur Stärkung der Flexibilität reichen alleine nicht aus, so sehr sie sich in jüngster Vergangenheit bewährt haben. Vielmehr sind großflächige Investitionen in Flexibilität unerlässlich.

Parallel dazu gewinnt der Begriff „Flexibilitätsgerechtigkeit“ in der internationalen Debatte immer stärker an Bedeutung. Im Mittelpunkt steht dabei die Forderung, dass alle Interessengruppen beteiligt werden sollten, wenn es um die Gestaltung und Realisierung flexibler Stromsysteme sowie um die Bereitstellung von Flexibilität und den Handel mit Flexibilität geht.



■ Abb. 2: Sonnenkollektoren auf dem Dach eines Industriegebäudes (Foto: ist).

keit von Technologien zu vermeiden, die sich zwar kurzfristig vorteilhaft auswirken, auf beispielsweise auf eine Flexibilitätsbereitstellung, langfristig aber hinter den notwendigen Zielen der Energiewende zurückbleiben.

Daran ist gerade angesichts der COVID-19-Folgen zu erinnern. Der pandemiebedingte Rückgang der industriellen Produktion führte im Energiesektor zu einem Nachfrageschock, der die Preise für fossile Brennstoffe zeitweise sinken ließ. Diese Entwicklung stärkte vorübergehend die Wettbewerbsfähigkeit von Flexibilitätsanlagen, die mit diesen Brennstoffen betrieben werden und dabei Treibhausgase freisetzen. In der Tat haben manche Stromversorgungsunternehmen während der COVID-19-Periode teils massiv Öl und Gas beschafft und sogar neue Tanks zur Lagerung dieser Brennstoffe gebaut. Infolgedessen sanken zeitgleich die wirtschaftlichen Aussichten für nicht-fossile Flexibilitätsoptionen. Die Folge war eine wachsende Verunsicherung ausgerechnet derjenigen Investoren, die sich bereits auf eine „grüne“ Flexibilisierung des Energiesektors eingestellt hatten. Vor diesem Hintergrund ist es jetzt von entscheidender Bedeutung, die Investitionssicherheit für diesen Sektor (wieder)herzustellen und zu stärken. Synergien mit den klimapolitischen Konzepten und Maßnahmen nationaler Regierungen können dabei ein kohärentes Investitionsklima schaffen.

Hinzu kommt eine faire Verteilung der zugehörigen Kosten und Erlösmöglichkeiten in einem künftigen Stromsystem. Alle *Stakeholder* sind in die Formulierung von Energiegesetzen und in Regulierungsvorhaben einzubeziehen, die geeignet sind, die Entwicklung hin zu kohlenstoffdioxidarmen, widerstandsfähigen und gerechten Stromsystemen zu fördern.

Politischer Handlungsbedarf

Die Regierungen der Mitgliedsländer der Europäischen Union haben auf die durch COVID-19 ausgelösten Wirtschaftseinbrüche mit umfangreichen Rettungs- und Konjunkturprogrammen reagiert. Ein ebenso starkes Engagement sollte jetzt der Energiewende gelten, die mit Nachdruck auch als eine Flexibilitäts- und Resilienz- und Konjunkturwende verstanden werden sollte. Die politische Dynamik, wie sie sich im Zuge der Bekämpfung der Pandemie entwickelt hat, bietet hierfür eine gute Voraussetzung. Sie sollte jetzt genutzt und weitergeführt werden, um Anreize für Flexibilitätsinvestitionen in eine proaktive Wirtschafts- und Energiepolitik zu integrieren. Zumindest als eine Art Brückentechnologie werden Gaskraftwerke in zukünftigen Energiesystemen zweifellos eine wichtige Rolle spielen, da sie technisch in der Lage sind, schnell hochzufahren, und im Vergleich zu Kohlekraftwerken deutlich weniger Treibhausgase ausstoßen. Die Politik sollte aber beispielsweise stärker als bisher Anreize dafür schaffen, dass „grünes“ – also aus erneuerbaren Quellen gewonnenes – Gas im Energiesystem eingesetzt wird. Die Entscheidungsträger in Politik und Wirtschaft dürfen das Gesamtziel der Energiewende, die Dekarbonisierung des Energiesystems, nicht aus dem Blick verlieren. Es gilt, die dauerhafte Abhängig-

Nicht zuletzt die jüngsten Entwicklungen in Deutschland unterstreichen, dass dies eine realistische Option ist: Trotz der negativen wirtschaftlichen Auswirkungen der Pandemie sind die politisch Verantwortlichen den Empfehlungen einer Kohleausstiegskommission gefolgt, in welche die Erwartungen der wichtigsten Interessengruppen eingeflossen sind. Es wurde ein Gesetz für den Ausstieg aus der Kohle bis zum Jahr 2038 erarbeitet, um einem gerechten Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft den Weg zu bahnen. Dies wurde flankiert von verschiedenen Beschlüssen und politischen Initiativen in Deutschland und in der Europäischen Union. Dabei muss der Zugang zu erschwinglicher, zuverlässiger und nachhaltiger Energie für alle gewährleistet sein – nicht nur in den westlichen Industriestaaten, sondern weltweit. Eine globale Zusammenarbeit, die darauf abzielt, die Entwicklungsländer an den Vorteilen nachhaltiger, flexibler Energiesysteme teilhaben zu lassen, ist vielversprechend: Sie ist zweifellos ein Schlüssel zur schrittweisen Realisierung der von den Vereinten Nationen beschlossenen „Agenda 2030“ und ihren Nachhaltigkeitszielen.

Energieflexible Fabriken der Zukunft

Dr. Martin Weibelzahl leitet in der Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Kopernikus-Projekt SynErgie, das sich mit der Gestaltung eines nachhaltigen Energiesystems befasst. Insbesondere die energieintensive Industrie verfügt in Deutschland mit einem Stromverbrauch von rund 40 Prozent über enorme Potentiale, Schwankungen von erneuerbaren Energien durch energieflexible Prozessen auszugleichen. Im Projekt untersucht Dr. Martin Weibelzahl die regulatorischen Änderungen, die erforderlich sind, um das Flexibilitätspotential der deutschen Industrie nutzbar zu machen.

www.kopernikus-projekte.de/synergie

- 1 S. Halbrügge et al.: How did the German and other European electricity systems react to the COVID-19 pandemic?, siehe Literaturtipps.
- 2 R. J. Heffron et al.: The role of flexibility in the light of the COVID-19 pandemic and beyond: Contributing to a sustainable and resilient energy future in Europe, siehe Literaturtipps.
- 3 Siehe auch E. M. Ländner et al.: From energy legislation to investment determination: shaping future electricity markets with different flexibility options. *Energy Policy* (2019), 129, 1100–1110. 10.1016/j.enpol.2019.02.012 – R. Heffron et al.: Industrial demand-side flexibility: A key element of a just energy transition and industrial development. *Applied Energy* (2020), 269, 115026. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115026.
- 4 G. Fridgen et al.: A holistic view on sector coupling. *Energy Policy* (2020), 147, 111913. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111913.
- 5 H. U. Buhl et al.: Bewertung von Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem 2021 bis 2035 unter Berücksichtigung der Holzverfeuerung. Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT, Augsburg/Bayreuth 2021.



■ Alexandra Molitorisová
Kai Purnhagen

Vom Umgang mit Ungewissheit in der Gesetzgebung

Zur Regulierung gentechnisch veränderter Organismen in der EU

■ Die Gen-Editierung bietet neue Möglichkeiten, die Struktur der DNA von Pflanzen und somit deren Eigenschaften gezielt zu verändern (Foto: ist).

Unter der Überschrift „Gentechnisch veränderte Organismen lieben lernen“ („Learning to Love G.M.O.s“) erschien im Juli 2021 im *New York Times Magazine* ein Beitrag, der sich mit der öffentlichen Akzeptanz von Lebensmitteln auseinandersetzt, die gentechnisch veränderte Organismen (GVO) enthalten.¹ Die Autorin Jennifer Kahn schlägt darin eine neue Sichtweise vor: Infolge der Gen-Editierung seien Nischen-Märkte für Produkte entstanden, die sich von herkömmlichen GVO-basierten Lebensmitteln deutlich unterscheiden. An der Erzeugung dieser Produkte sind kleine landwirtschaftliche und verarbeitende Betriebe sowie kleine Labors beteiligt, denen es auf bestimmte Merkmale von Pflanzen und Lebensmitteln ankommt – sei es ein spezieller Nährstoff, ein ungewöhnlicher Geschmack oder eine bestimmte medizinische Wirkung. Zudem können Pflanzensorten mit Hilfe der Gen-Editierung an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden: Wo Arbeitskräftemangel herrscht, kann das Wachstum von Kirschbäumen so beeinflusst werden, dass sich die Früchte leichter pflücken lassen. Wo Frosteinbrüche und starke Regenfälle drohen, ist dennoch ein ganzjähriger Anbau von Kirschen möglich. Zudem können Geschmacksrichtungen und Aromen durch den Wiederaufbau verlorengegangener Pflanzensorten neu entdeckt werden. Die Gen-Editierung scheint nahezu unbegrenzte Möglichkeiten für neue Produkte und Märkte zu eröffnen.

Hier wird ein Unterschied zu früheren gentechnischen Verfahren sichtbar: Traditionell zeichnen sich GVO vor allem durch Eigenschaften aus, die unter den Bedingungen einer gestiegenen Pestizidresistenz zu höheren Erträgen führen. Diese landwirtschaftlichen Vorteile lassen sich zwar auch mithilfe der Gen-Editierung erzielen, die auf diese Weise einen Beitrag zur globalen Nachhaltigkeit leistet. Allerdings wird globale Nachhaltigkeit von den meisten Verbraucher*innen wohl eher *indirekt* als ein Vorteil wahrgenommen – und dies auch nur dann, wenn ihnen grundlegende Zusammenhänge zwischen Erträgen, Schädlingsbekämpfung, Landnutzung und biologischer Vielfalt bewusst sind. Im Gegensatz dazu versprechen die neuen Technologien der Gen-Editierung den Verbraucher*innen einen *direkten*, unmittelbar erfahrbaren Nutzen: neue Erlebnisse, bisher unbekannte Geschmacksrichtungen, mehr Nährstoffe oder eine verbesserte Gesundheit. Reichen aber diese Vorteile der Gen-Editierung aus, um einen neuen „liberaleren“ Gesetzesrahmen für GVO-basierte Lebensmittel zu rechtfertigen? Und wenn ja, lassen sich die Verbraucher allein schon durch diese Vorteile zur Akzeptanz der Gen-Editierung bewegen?

Entscheidungen unter dem Einfluss von Vorurteilen

Neuerdings ist in der EU eine steigende Unzufriedenheit mit dem Status quo der rechtlichen Regulierung von GVO zu beobachten, und das Drängen auf Verbesserungen stößt auf wachsende Resonanz – insbesondere innerhalb der Wissenschaft, da die Vorteile der Gen-Editierung und ihre gesellschaftliche Bedeutung immer klarer zutage treten. Die jetzige Rechtslage in der EU, die den Einsatz der Gen-Editierung in der Lebensmittelproduktion stark beschränkt, wurde zweifellos in gutem Glauben geschaffen. Aber sie beruht möglicherweise auf Missverständnissen, die die moderne Verhaltensforschung als „Biases“ (Vorurteile) bezeichnet. Vorurteile, welche die Entscheidungsfindung beeinflussen, gelten in diesem Zusammenhang als Abweichung vom Modell einer rational handelnden Person. Wenn Menschen sich von Vorurteilen leiten lassen – beispielsweise als Mitglieder der Legislative beim Erlassen rechtlicher Vorschriften oder als Bürger*innen, welche sich an diesen Vorschriften orientieren – handeln sie diesem Modell zufolge nicht rational. Ihre handlungsbestimmenden Vorurteile erweisen sich dabei als hartnäckig und widerstandsfähig, selbst wenn sich die Zeiten ändern. Auch eine Legislative lässt sich nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt von Vorurteilen leiten. Oftmals werden die gleichen Vorurteile von einer Generation an die nächste weitergegeben – ohne dass sie dabei als Vorurteile erkannt werden. Es ist auch nicht so, dass die Legislative in einer Demokratie weniger für Vorurteile anfällig wäre als die Bürger*innen. Als Verfassungsorgan, deren Mitglieder gewählt werden, spiegelt sie die Vorurteile, Präferenzen und Ängste der Wähler*innen wider.



■ Abb. 1: Niedrige Kirschbäume ermöglichen eine schnellere Ernte (Foto: ist).

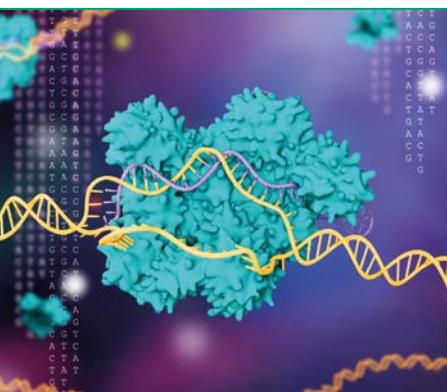
Ein Beispiel für ein langlebiges Vorurteil ist die verbreitete Vorstellung, dass die Natur prinzipiell gutartig oder wohlwollend sei, während menschliche Eingriffe die Gesundheit oder die Umwelt gefährden würden. Möglicherweise hat diese Sichtweise auch die Gesetzgebung innerhalb der EU beeinflusst. Es

LITERATURTIPPS

K. Purnhagen: The Behavioural Law and Economics of the Precautionary Principle in the EU and Its Impact on Internal Market Regulation. *Journal of Consumer Policy* (2014), 37, 453-464. DOI: 10.2139/ssrn.2344356.

A. Tor: The Methodology of the Behavioral Analysis of Law. *Haifa Law Review* (2008), Vol. 4, 237.

K. Purnhagen et al.: Europe's Farm to Fork Strategy and Its Commitment to Biotechnology and Organic Farming: Conflicting or Complementary Goals?, *Trends in Plant Science* (2021), Vol. 26 (6), 600-606. DOI: 10.1016/j.tplants.2021.03.012.



■ Abb. 2: 3D-Illustration der CRISPR-Cas9-Technologie zur Gen-Editierung (Foto: ist).

könnte sein, dass sie sich mittlerweile unter dem Eindruck der Covid-19-Pandemie verändert hat, insbesondere in Anbetracht des Ursprungs des Virus (Natur) und der Technologie, die der Impfstoff-Entwicklung zugrunde liegt (Gen-Editierung). Ob die Pandemie damit auch zur einer langfristigen Abschwächung der bestehenden Vorurteile gegenüber gentechnisch veränderten Lebensmitteln beitragen wird, bleibt abzuwarten.

Ein weiteres Beispiel ist die stark ausgeprägte Abneigung gegen Verluste und Gefährdungen des Status quo. Sie veranlasst nicht nur individuelle Personen, sondern auch den Gesetzgeber dazu, lieber präventiv und vorsorgend zu handeln, statt in erster Linie den möglichen Nutzen neuer Technologien in Betracht zu ziehen. Der Gesetzgeber neigt dabei zur Vernachlässigung bestimmter Risiken. So kann beispielsweise die Überbetonung von Risiken neuer Technologien für die menschliche Gesundheit dazu führen, dass andere Risiken aus dem Blick geraten – nicht zuletzt das Risiko, dass potentielle Vorzüge dieser Technologien ungenutzt bleiben.

„Vielen Verbraucher*innen ist der Unterschied zwischen der Gen-Editierung mithilfe der ‚Gen-Schere‘ und älteren Verfahren der Gentechnik nicht klar, so dass sie gentechnisch veränderte Organismen grundsätzlich für unsicher halten.“

Wenn sich die Legislative von derartigen Vorurteilen bestimmen lässt, findet sie sich sehr bald in einer Blockade wieder, aus der es keinen einfachen Ausweg gibt: Schon eine moderate Verbesserung der bestehenden Gesetzeslage ist nicht leicht, und ein Umschwenken zu einer flexiblen, proaktiven Form der Regulierung – "zukunftsorientiert, ergebnisbetont, experimentell, reaktionsfähig, kooperativ"² – ist erst recht schwierig. Gesetzliche Regelungen sollen relativ beständig sein, und es muss absehbar sein, dass die Menschen sich im Allgemeinen so verhalten, wie es von ihnen erwartet wird. Genau in dieser Beständigkeit und Vorhersagbarkeit steckt jedoch ein Problem: Eine Regelung, welche die Sicherheit eines Produkts garantiert, signalisiert den Verbraucher*innen, dass grundsätzlich *alle* Produkte, die unter diese Regelung fallen, potentiell unsicher oder sogar gefährlich sind. Problematisch ist diese Verallgemeinerung insbesondere dann, wenn zur Herstellung der Produkte einerseits seit langem vorhandene und andererseits neu entstehende Technologien eingesetzt werden, deren unterschiedliche Funktionswei-

sen den Verbraucher*innen nicht bekannt sind. Dies gilt gerade auch für gesetzliche Regelungen, die den Einsatz von GVO in der Lebensmittelproduktion betreffen. Vielen Verbraucher*innen ist der Unterschied zwischen der Gen-Editierung mithilfe der „Gen-Schere“ und älteren Verfahren der Gentechnik nicht klar, sodass sie gentechnisch veränderte Organismen grundsätzlich für unsicher halten.

In dem bereits zitierten Artikel des *New York Times Magazine* wird diese Fehleinschätzung darauf zurückgeführt, dass die meisten Menschen die Funktionsweise von Genen grundlegend missverstehen. Möglicherweise ist dies aber nicht die einzige Ursache. Denn auch auf weiteren Gebieten mangelt es heute an Wissen, das für eine angemessene Einschätzung der Gen-Editierung erforderlich ist. So sind Kenntnisse über die Züchtung von Pflanzen und Tieren sowie über deren Bedeutung für die Entwicklung der Menschheit oft gar nicht mehr vorhanden. Ein Beispiel: Genetische Mutationen, die wegen ihres negativen Selektionswerts vom Standpunkt der Arten aus gesehen unvorteilhaft waren, wurden dennoch systematisch gezüchtet, weil sie sich für den Menschen auf die eine oder andere Weise als nützlich erwiesen. Vertiefte Kenntnisse dieser Zusammenhänge könnten dazu beitragen, dass sich die Einstellung der Öffentlichkeit in Bezug auf GVO ändert.

Unsicherheit durch gesetzliche Regelungen

Vorhersehbarkeit und Beständigkeit in der Gesetzgebung sind anscheinend nicht gut vereinbar mit einer klugen, umsichtigen und von Flexibilität geprägten Einstellung, mit der man an die Frage kausaler Beziehungen zwischen technologiebedingten Risiken und zu erwartenden Schäden herangehen sollte. Eine gesetzliche Regelung, welche für die Marktzulassung von Produkten einer bestimmten Kategorie eine Sicherheitsbewertung vorschreibt, wird die Verbraucher*innen voraussichtlich vom Kauf dieser Produkte abhalten. Die Wahrscheinlichkeit ist hoch, dass sie *allen* Produkten dieser Kategorie ängstlich gegenüberstehen.



■ Abb. 3 und 4: Im Fokus der Verbraucher*innen: Inhaltsstoffe von Lebensmitteln (Fotos: ist).

Das GVO-Zulassungsverfahren in der EU, in dem sich wissenschaftliche und politische Bewertungen vermischen, ist von der Art, dass in den letzten 30 Jahren innerhalb der EU nur sehr wenige Lebensmittel auf GVO-Basis zugelassen wurden. Ein *positives* Zulassungsverfahren, das sich nicht allein auf die Abwesenheit von Gefahren, sondern auf nachweisbare *Vorteile* für die Verbraucher*innen stützen würde, fehlt. Dieser Mangel verstärkt Gefühle der Verunsicherung, der Abneigung und der Angst gegenüber gentechnisch veränderten Produkten. Und wann immer Menschen unsicher sind, suchen sie nach kausalen Zusammenhängen. Dies führt dazu, dass sie zwischen GVO-basierten Lebensmitteln, die eine behördliche Zulassung erfordern, und Gefahren für die menschliche Gesundheit unreflektiert eine kausale Verbindung herstellen. Diese Tendenz wird dadurch verstärkt, dass – wie bereits erwähnt – der traditionelle Einsatz von GVO in der Lebensmittelproduktion den Verbraucher*innen meist nur auf *indirekte* Weise zugute kommt.

Der gegenwärtige EU-Rechtsrahmen, der gleichermaßen für herkömmliche Verfahren der Gentechnik und die Gen-Editierung gilt, enthält noch ein weiteres Problem: Die strenge Regulierung impliziert eine hohe Regulierungslast, und eine hohe Regulierungslast kann wiederum nur von großen, kapitalkräftigen Unternehmen getragen werden. Es sind aber gerade die Befürworter*innen einer strengen GVO-Verordnung, die gegenüber großen Unternehmen besonders misstrauisch sind.

„De-biasing“: ein wegweisender Ansatz aus der Verhaltensforschung

Es gibt also zahlreiche Anhaltspunkte dafür, dass sich in den restriktiven GVO-Regelungen der EU die von der Verhaltensforschung herausgearbeiteten Merkmale einer vorurteilsbehafteten Entscheidungsfindung widerspiegeln. Falls dieser Erklärungsansatz zutrifft, kann die Verhaltensforschung möglicherweise auch dazu beitragen, einen Ausweg aus dieser Sackgasse zu bahnen. Vor allem die folgende Einsicht dürfte dabei hilfreich sein: Wenn unter den

gegebenen Verhältnissen vorurteilsbehaftete Entscheidungen getroffen werden, ist der gezielte Abbau von Vorurteilen („De-biasing“) ein geeignetes Instrument, um das Zustandekommen gut begründeter gesetzlicher Regelungen zu fördern.³ Dieser Abbau kann rechtliche und nicht-rechtliche Formen annehmen. Ein nicht-rechtliches Mittel ist die aktive Kommunikation, die den jeweiligen Interessengruppen ihre Vorurteile bewusst macht und sie in die Lage versetzt, bessere – weil unvoreingenommene – Entscheidungen zu treffen. Diesem Ansatz folgend, untersucht die Denkfabrik „Re-imagine Europe“ auf europäischer Ebene das Potenzial zum Abbau von Vorurteilen in der GVO-Debatte.⁴ Darüber hinaus sollte eine weitere Erkenntnis der Verhaltensforschung genutzt werden: Wenn in einem System der Gesetzgebung Vorurteile allgegenwärtig sind und die Entscheidungsfindung beeinflussen, sollte dieses System daraufhin untersucht werden, welche Potenziale *es selbst* enthält, um Entscheidungsträger von Vorurteilen zu befreien und fehlerhafte Entscheidungen möglichst zu verhindern.⁵

Ein bekanntes Beispiel dafür, wie vorurteilsgeleitete Entscheidungen durch eine rechtliche Regelung zurückgedrängt werden können, findet sich im Internethandel. Verbraucher*innen haben die Möglichkeit, bereits getroffene Kaufentscheidungen in den folgenden 14 Tagen zu überdenken und gegebenenfalls ohne nachteilige Folgen rückgängig zu machen. In ähnlicher Weise könnte das Recht auch den für gesetzliche Regelungen verantwortlichen Personen die Möglichkeit einräumen, ihre Entscheidungen zu überprüfen. Oft müssen sie ihre Entscheidungen rasch und im Einklang mit den Erwartungen unterschiedlicher Interessengruppen treffen. Vorurteile fließen unter diesen Umständen leicht in die Entscheidungsfindung ein. Ein Instrument, um gesetzliche Regelungen von Vorurteilen möglichst freizuhalten, könnte die Gewährung einer „Bedenkzeit“ sein – und zwar in der Weise, dass Rechtssetzungs- und Regulierungsentscheidungen bei ihrer Veröffentlichung mit einem Verfallsdatum versehen werden. EU-Behörden könnten Leitlinien herausgeben, wonach die getroffenen Entscheidungen bis zum Ablauf der Frist daraufhin zu überprüfen sind, ob und inwieweit sie durch Vorurteile bedingt sind. Falls der betreffende Rechtsakt auf Artikel 114 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union beruht, wie die meisten GVO-Vorschriften in der EU, kann sich in einem „De-biasing through law“ auch die Möglichkeit widerspiegeln, Maßnahmen zur Harmonisierung der Rechtslage in der EU dem aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisstand anzupassen.



■ Abb. 5: Genetisch modifizierte, gegen das Scharka-Virus resistente Zwetschgensorte (Foto: wikimedia commons / Scott Bauer, USDA ARS / PD).

AUTOREN



Prof. Dr. Kai Purnhagen ist Inhaber des Lehrstuhls für Lebensmittelrecht an der Universität Bayreuth.



Alexandra Molitorisová ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Lehrstuhl für Lebensmittelrecht an der Universität Bayreuth.

- 1 <https://www.nytimes.com/2021/07/20/magazine/gmos.html> (29.09.2021)
- 2 <https://civilservice.blog.gov.uk/2021/01/20/a-brave-new-world-agile-regulation-to-unleash-innovation/> (29.09.2021)
- 3 A. Tor: The Methodology of the Behavioral Analysis of Law. *Haifa Law Review* (2008), Vol. 4, 237-327, mit Verweis auf C. Jolls and C. R. Sunstein: Debiasing through Law. *Journal of Legal Studies* (2006), Vol. 345(1), 199-242.
- 4 <https://reimagine-europa.eu/re-imagining-european-agri-culture>. (29.09.2021)
- 5 „(T)he legal analyst must go still farther and examine the potential of the legal system actively to debias decision makers and thereby eliminate or reduce decision errors“, in: A. Tor, siehe Anm. 3, hier: 293.



Ungewissheit im Recht

Vom Feststellbaren
und Festzustellenden

■ Die Rechtswissenschaft unterscheidet sich von anderen Norm-
Wissenschaften dadurch, dass der zur Interpretation anstehende
Gegenstand mit einem rechtlichen Geltungsanspruch verbunden ist
(Foto: ist).



Die Ungewissheit ist nichts Ungewöhnliches. Sie begegnet den Juristinnen und Juristen

- als epistemische Ungewissheit, auf der Ebene der Feststellung bzw. Feststellbarkeit von Tatsachen und
- als normative Ungewissheit, auf der Ebene der Feststellung bzw. Feststellbarkeit des normativen Gehalts von Rechtssätzen.

Die erste Form der Ungewissheit spielt in der juristischen Ausbildung kaum eine Rolle; sie trifft universitär ausgebildete Juristinnen und Juristen daher erst in der Praxis mit schockierender Überraschungskraft. Sie ist allerdings auch keine Ungewissheit, die der Rechtswissenschaft exklusiv vorbehalten bliebe, auch wenn sie im Recht eine besondere Bedeutung hat. Die zweite Form der Ungewissheit ist da schon exklusiver: Sie kennzeichnet die Rechtswissenschaft, die sich vordringlich mit Rechtssätzen und den darin enthaltenen Normen befasst, in kategorischer Weise. Diese normative Ungewissheit spielt folgerichtig auch in der Ausbildung eine grössere Rolle; sie wird aber gleichwohl zu wenig reflektiert. Im Laufe des Studiums wird sie unausgesprochen dem unausgesprochenen Anspruch auf Richtigkeit der im juristischen Gutachtenstil beschriebenen, vermeintlich eindeutigen Rechtslage geopfert. In den folgenden Zeilen werden beide Ungewissheiten und der Umgang des Rechts mit ihnen näher betrachtet und einige daraus abzuleitende Konsequenzen für die Rechtswissenschaft gezogen.

Zur epistemischen Ungewissheit

Verstanden als Unsicherheit über das Geschehene prägt die epistemische Ungewissheit die Tätigkeit von Juristinnen und Juristen in der Praxis. Die Bestimmung des Geschehenen ist die logische Voraussetzung der rechtlichen Bewertung des Geschehenen. Daher steht in der juristischen Praxis die Feststellung (nicht etwa: die Festlegung) des Sachverhalts am Anfang: Was ist geschehen? Diese herausforderungsreiche Aufgabe wird im Studium des Rechts nahezu gänzlich ausgeklammert; trainiert wird vielmehr, gleichsam in Trockenübungen, einen als gegeben anzunehmenden Sachverhalt einer rechtlichen Lösung zuzuführen. Im Referendariat werden dann, wenn auch immer noch nur sehr am Rande, erste Schwimmversuche unternommen – etwa in Gestalt rechtspsychologischer Kurse zur Zeugenvernehmung, der Leitung einer mündlichen Gerichtsverhandlung oder auch der Teilnahme an

einer polizeilichen Hausdurchsuchung. Die Fähigkeiten zur Ermittlung des Geschehenen werden aber letztlich erst in der Praxis erlernt, genauer: durch sie geschult.

Ein Beispiel: Eine Strafrichter*in trifft ihre Entscheidung auf der Grundlage eines festgestellten Sachverhalts – dessen Sosein nie vollkommen sicher ist, was die Richter*in sicher weiß. Denn mit hinreichend Fantasie ließe sich jeder Geschehensablauf, und sei es auch nur im Glauben an das Übernatürliche, durch Kausalzusammenhänge erklären, die den Täter entlasten. So mag die Faust des Täters T im Gesicht des Opfers O zum Zeitpunkt Z am Ort Y durch die Aussage des Augenzeugen A belegt sein; doch wer will es ausschließen, dass alle drei Wahrnehmungsstörungen hatten und sich in Wahrheit am Ort X aufhielten, wo die Faust des A den O erreichte, unter den Augen des T? Oder könnte sich O selbst, höchst unglücklich, die eigene Faust zum Auge geführt haben, vielleicht dazu angetrieben durch einen imaginären Freund (dazu sehenswert: die TV-Serie „happy!“).

„Juristinnen und Juristen müssen, wenn sie für die Zukunft Regelungen erlassen wollen, Annahmen unter Ungewissheit treffen.“

Möglicherweise leben wir sogar alle in einer „Matrix“, in einer von Computern simulierten Realität, wie es uns kurz vor der Jahrtausendwende von den Wachowski-Brüdern im gleichnamigen Film nahegelegt wurde. Dann wäre im Grunde noch nie etwas von dem, woran wir uns erinnern, wirklich geschehen, es wäre alles immer nur implantierte Vorstellung, *virtual reality*. Eine Richter*in, die davon überzeugt wäre, dass wir alle nur virtuelle Teilnehmer einer Fantasiewelt seien, die eine künstlich-maschinelle Intelligenz uns nur deswegen zur Verfügung stellt, um – wie in „Matrix“ – ihren ansonsten nicht zu stillenden Energiehunger zu befriedigen, wäre freilich eine problematische Richter*in; vor allem dann, wenn sie sich nicht mehr bereit fände, zumindest in der vermeintlich virtuellen Realität ihrer Rolle gerecht zu werden.

Das Recht lässt sich auf derlei fantastische Ungewissheiten jedoch gar nicht erst ein. Es fordert die Wahrheit – lässt es aber genügen, wenn die Richter*in aufgrund der in der mündlichen Verhandlung erbrachten Beweise vom Geschehensablauf überzeugt ist; jenseits begründeten Zweifels. Damit erklärt das Recht ein bestimmtes, regelmäßig unvermeidbares Maß an Ungewissheit für unbeachtlich, um seine

AUTOR



Prof. Dr. Carsten Bäcker ist Inhaber des Lehrstuhls für Öffentliches Recht, Verfassungstheorie und Rechtsphilosophie an der Universität Bayreuth.

■ Abb. 1: Szene aus dem Filmklassiker „Die zwölf Geschworenen“ von 1957: Die Geschworenen müssen ein einstimmiges Urteil über die Schuld eines 18jährigen Puerto-Ricaners fällen, der des Mordes an seinem Vater angeklagt ist. Im Fall eines Schuldspruchs droht ihm die Todesstrafe (wikimedia commons).



Funktionen, beispielhaft die Strafrechtspflege, erfüllen zu können. Der Anspruch auf Wahrheitsermittlung zeigt sich etwa in § 244 Abs. 2 der Strafprozessordnung (StPO): „Das Gericht hat zur Erforschung der Wahrheit die Beweisaufnahme von Amts wegen auf alle Tatsachen zu erstrecken, die für die Entscheidung von Bedeutung sind“. Der Kniefall vor der Ungewissheit zeigt sich dann aber in § 261 StPO: „Über das Ergebnis der Beweisaufnahme entscheidet das Gericht nach seiner freien, aus dem Inbegriff der Verhandlung geschöpften Überzeugung“. Wahrheit follows Funktion; es muss entschieden werden, auch wenn die Wahrheit ungewiss bleibt. Das Strafurteil gründet sich, konsequenterweise, auf die „für erwiesen erachteten Tatsachen“, § 267 Abs. 1 StPO, die somit in gewisser Weise im Prozess juristischer Entscheidungsfindung doch festgelegt werden.

Eine weitere, typische Situation des juristischen Entscheidens unter epistemischer Ungewissheit ist die von Festlegungen für die Zukunft. Das Recht regelt im Regelfall Situationen, die erst morgen auftreten. Das gilt naturgemäß für Planungsentscheidungen, die eine zukünftige Nutzung von Grund und Boden ausweisen, aber auch für imperative oder quasi-imperative Verhaltensvorschriften, wie Ordnungswidrigkeiten und Straftatbestimmungen, die im Regelfall für die Zukunft wirken. Freilich sind auch rückwirkende rechtliche Regelungen ebenso denkbar wie grundsätzlich möglich, allerdings sind diese schon verfassungsrechtlich problematisch und im Strafrecht gänzlich ausgeschlossen, Art. 103 II GG. Für den Gestaltungsauftrag des Rechts wären rückwirkende Regelungen auch kaum zielführend. Denn

die Vergangenheit lässt sich nicht mehr verändernd gestalten, allenfalls kann ihre Wahrnehmung in der Gegenwart und ihre Bewertung in der Zukunft beeinflusst werden. Und doch knüpfen Regelungen, die erst in der Zukunft greifen, hermeneutisch unausweichlich an Erfahrungen aus der Vergangenheit an, für die die oben übertrieben beschriebenen Ungewissheiten gelten. Doch für Regelungen der Zukunft besteht eine eigene Art der Ungewissheit: Hier müssen wir nicht nur damit rechnen, dass unsere Wahrnehmung des Geschehenen vom tatsächlich Geschehenen abweicht (soweit wir diesen Unterschied überhaupt erkennen können), sondern auch davon ausgehen, dass nie jemand mit Gewissheit sagen kann, was in der Zukunft geschehen wird. Prognosen sind per se fehleranfällig, wie schon der Wetterbericht lehrt, und sie sind desto fehleranfälliger, je komplexer das Prognostizierte ist. Doch wäre es ein Fehler, Prognosen wie den Wetterbericht allein wegen der Fehleranfälligkeit vollständig zu ignorieren.

Diese Option haben Juristinnen und Juristen ohnehin nicht, wenn sie für die Zukunft Regelungen erlassen wollen. Sie müssen dann Annahmen unter Ungewissheit treffen. Diese Aufgabe kommt zwar originär der Politik bzw. den dazu berufenen Institutionen im Rechtsgefüge zu. Aber es obliegt Juristinnen und Juristen, die unter bestimmten Annahmen getroffenen politischen Entscheidungen letztlich in Rechtssätze zu überführen. Die in Rechtssätze gegossenen politischen Entscheidungen sind dann auch gerichtlich, und das heißt juristisch, überprüfbar. Ein Beispiel ist die Entscheidung des Ersten Senats des Bundesverfassungsgerichts zum Klimaschutzgesetz vom

24. März 2021. Hier hat das höchste deutsche Gericht – in klima- wie gesellschaftspolitischer Hinsicht spektakulär und auch rechtsdogmatisch durchrüttelnd – die bestehende, den Zeitraum bis 2030 betreffende gesetzliche Regelung für verfassungswidrig erklärt. Diese Regelung, so die Begründung, werde in der nicht (!) geregelten Zukunft, also: nach 2030, laut den zur Verfügung stehenden Prognosen über den Klimawandel zu erheblichen Grundrechtsbeeinträchtigungen der Beschwerdeführer führen müssen. Dieser Argumentation ist zu entnehmen, dass Entscheidungen mit Wirkung für die Zukunft auf der Grundlage gegenwärtiger, unvermeidlich epistemisch ungewisser Prognosen gefällt werden müssen und daraufhin kontrolliert werden können – im Sinne von Art. 20a GG *in dubio pro futuro*.

Zur normativen Ungewissheit

Ganz anderer Art ist die normative Ungewissheit. Sie begegnet Juristinnen und Juristen im Kern ihrer Tätigkeit: dem Versuch, die normativen Aussagen in Rechtssätzen zu ermitteln. Rechtstexte sind sprachlich verfasst. Sprache bedarf der Entschlüsselung, um die sprachlich vermittelte Bedeutung zu ermitteln. Dieser Vorgang der Entschlüsselung ist der der



Gefahren des Klimawandels und die Schutzpflicht des Staates

„Der Schutz des Lebens und der körperlichen Unversehrtheit nach Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG schließt den Schutz vor Beeinträchtigungen durch Umweltbelastungen ein, gleich von wem und durch welche Umstände sie drohen. Die aus Art. 2 Abs. 2 Satz 1 GG folgende Schutzpflicht des Staates umfasst auch die Verpflichtung, Leben und Gesundheit vor den Gefahren des Klimawandels, etwa vor klimabedingten Extremwetterereignissen wie Hitzewellen, Wald- und Flächenbränden, Wirbelstürmen, Starkregen, Überschwemmungen, Lawinengebängen oder Erdbeben, zu schützen. Sie kann eine objektivrechtliche Schutzverpflich-

tung auch in Bezug auf künftige Generationen begründen. Da infolge des Klimawandels Eigentum, zum Beispiel landwirtschaftlich genutzte Flächen und Immobilien, etwa aufgrund steigenden Meeresspiegels oder wegen Dürren Schaden nehmen können, schließt auch das Grundrecht auf Eigentum aus Art. 14 Abs. 1 GG eine Schutzpflicht des Staates hinsichtlich der Eigentumsgefahren des Klimawandels ein.“

Aus: „Verfassungsbeschwerden gegen das Klimaschutzgesetz teilweise erfolgreich“, Pressemitteilung Nr. 31/2021 des Bundesverfassungsgerichts vom 29. April 2021.

Interpretation des Rechts; ohne Auslegung kann kein Rechtssatz zur Anwendung kommen. Strukturell unterscheidet sich diese Auslegung von Rechtssätzen nur wenig von der Ermittlung der Bedeutung sonstiger Texte. Gleichwohl stellt sie einen Sonderfall dar, weil sie auf die Ermittlung normativer Bedeutung gerichtet ist. Auch das ist freilich noch kein Alleinstellungsmerkmal der Rechtswissenschaft; die Theologie hat eine ähnliche Zielsetzung, mit Abstrichen auch die praktische Philosophie.

Die Rechtswissenschaft unterscheidet sich von anderen Norm-Wissenschaften jedenfalls dadurch, dass der zur Interpretation anstehende Gegenstand mit einem rechtlichen Geltungsanspruch verbunden ist. Es ist die Aufgabe von Juristinnen und Juristen, zu ermitteln, was in Anbetracht der gegebenen Rechtssätze rechtlich gilt. Daraus ergeben sich bestimmte Eingrenzungen der Auslegungsmethoden und Auslegungsziele, die sich unter anderem danach bestimmen, wessen Wille, Maßstab oder Horizont in der zu ermittelnden Norm zum Ausdruck kommen muss oder soll: der des (ursprünglichen) Normsetzers oder der des (gegenwärtigen) Normanwenders? Diese Überlegungen deuten tiefe Fragen der Legitimation des Rechts an, die von der Juristischen Methodenlehre, der Rechtstheorie und der Rechtsphilosophie bearbeitet werden.

Losgelöst von diesen tiefen materiellen Fragen lassen sich, analytisch betrachtet, drei Zielsetzungen unterscheiden, mit denen Juristinnen und Juristen die Interpretation von Rechtssätzen angehen können: Es kann darum gehen,

■ Abb. 2: Gebäude des Bundesverfassungsgerichts in Karlsruhe (Foto: Guido Radig / wikimedia commons).

■ Abb. 3: Gebäude des Europäischen Gerichtshofs in Luxemburg (Foto: Luxofluxe / wikimedia commons).



Foto: ist.

- die einzig richtige Interpretation zu finden (qualifizierter Richtigkeitsanspruch),
- eine richtige Interpretation (einfacher Richtigkeitsanspruch) oder
- genau eine Interpretation, ob richtig oder nicht (kein Richtigkeitsanspruch).

Die erste Variante setzt voraus, dass das Recht auf jede Rechtsfrage die eine richtige Antwort gibt – die Herausforderung besteht dann darin, sie zu finden. Sie unterstellt, dass diese Antwort prinzipiell gefunden werden kann; und ein überirdischer Rechtsanwender, wie der imaginierte *Judge Hercules* des U.S.-amerikanischen Rechtsphilosophen Ronald Dworkin, wäre auch imstande, sie zu finden. Nicht-herkulischen Richtern können dagegen immer Fehler passieren, sie können daher nie sicher sein, die eine richtige Antwort gefunden zu haben. Diese Ungewissheit resultiert aber nicht aus der Unterdefiniertheit des Rechts, sondern aus der Mangelhaftigkeit des Rechtsanwenders. Fehleranfälligkeit statt Richtigkeit.

Die zweite Variante erkennt an, dass das Recht nicht immer genau eine, sondern bisweilen auch mehrere Antworten auf eine Rechtsfrage bereithalten kann, die im Grundsatz alle gleichermaßen rechtlich richtig sein können. Das entlastet die in der Praxis tätigen Juristinnen und Juristen: Es genügt demnach, wenn sie begründet den Anspruch erheben, eine rechtlich richtige Antwort gefunden zu haben; sie müssen nicht den – potentiell fehlgehenden und ihre Möglichkeiten übersteigenden – Anspruch erheben, die einzig richtige Antwort bestimmt zu haben. Doch diese Konzeption hat gegenüber der ersten eine wesentliche Schwäche: Der Anspruch auf eine richtige Antwort wird denjenigen kaum überzeugen, der den begründeten Anspruch erhebt, eine andere, ebenso richtige Antwort gefunden zu haben. Damit wäre das Feld für eine potentiell endlose argumentative Debatte um die Wahl der Alternative richtigen Rechts eröffnet – die letztlich nur qua Autorität, die des letztinstanzlichen Gerichts, zu entscheiden ist. Autorität statt Richtigkeit.

Die dritte Variante macht die Antwort auf die Schwäche der zweiten Variante zum Leitmotiv: Es muss überhaupt nur eine Entscheidung geben. Freilich wird die bloße Tatsache des Aussprechens einer Entscheidung durch eine dafür zuständige rechtliche Institution wie einem Gericht denjenigen nicht überzeugen können, der nicht nur irgendeine Entscheidung will, sondern eine richtige. Willkür statt Richtigkeit.

Mit diesen Varianten sind die drei wesentlichen Modelle juristischer, insbesondere richterlicher Entscheidungen skizziert: Das Erkenntnismodell, das Argumentationsmodell und das Deziisionsmodell. Vieles spricht dafür, dass das Argumentationsmodell den goldenen Mittelweg darstellt: Weder überfordert es die juristische Praxis dahingehend, kontrafaktisch beanspruchen zu müssen, auf jede vorgelegte Rechtsfrage die einzig richtige Entscheidung gefunden zu haben, noch lässt es die Praxis zu einem bloßen Instrument der effektiven Steuerung durch Macht verkommen. Auch hat das Argumentationsmodell den Vorzug, dass es den Anspruch des Rechts auf Richtigkeit weder überhöht noch untergräbt. Freilich bleibt das Vertretbarkeitsproblem bestehen: Wieso soll sich etwa ein Angeklagter damit zufrieden geben, dass es eine vertretbare, durchaus richtige, jedenfalls aber nicht falsche Interpretation des geltenden Rechts ist, ihn mit einer Freiheitsstrafe zu belegen – obschon ein Freispruch (wohlgemerkt: aufgrund einer anderen Rechtsinterpretation, nicht aus Gründen der epistemischen Ungewissheit, da gilt *in dubio pro reo*) mit ebenso guten Argumenten vertretbar gewesen sein könnte?

Um dieses Vertretbarkeitsproblem zu lösen, ist in der Rechtstheorie, etwa vom Frankfurter Rechtsphilosophen Ulfrid Neumann, folgender Ansatz vorgeschlagen worden:¹ Der Richter müsse hier so tun, als ob er die einzig richtige Lösung gefunden habe, damit die Autorität des Rechts nicht durch das Erheben eines geringeren Anspruchs untergraben wird. Darin steckt pragmatische Klugheit; aber der Vorschlag bleibt doch unbefriedigend, denn er läuft darauf hinaus, dass die am Gerichtsverfahren Beteiligten über die Leistungsfähigkeit des Richters und des Rechts getäuscht werden. In der Praxis muss es daher genügen, wenn der Richter den einfachen Anspruch auf Richtigkeit seiner Entscheidung erhebt. Aussichtsreich ist dagegen nur vorzugehen, wenn die Entscheidung mit guten Gründen nicht nur anders hätte ausfallen können, sondern anders hätte ausfallen müssen. Dies könnte im Strafrecht dadurch erreicht werden, dass der Grundsatz *in dubio pro reo* auf die normative Ungewissheit ausgeweitet werden könnte.

Festhalten lässt sich: Es ist gewiss, dass die Rechtswissenschaft mit epistemischen und normativen Ungewissheiten umgehen kann. Dafür hat sie Verfahren etabliert. Denn Ungewissheiten sind für Juristinnen und Juristen unumgänglich – aber beherrschbar, wenn der Anspruch an das Recht und dessen Richtigkeit nicht überhöht wird.

¹ Dazu näher C. Bäcker: Anspruch und Wirklichkeit des richterlichen Entscheidens: Ulfrid Neumann und die Illusion der einzig richtigen Antwort, in: F. Saliger (Hg.): Rechtsstaatliches Strafrecht: Festschrift für Ulfrid Neumann zum 70. Geburtstag, Heidelberg 2017, 43-54.

INTERVIEW MIT PROF. DR. CARSTEN BÄCKER

■ Christian Wißler

Zur Rationalität juristischer Argumentationen

Bei ihrem Wechsel von der Universität zu Kiel an die Universität Bayreuth im Sommer 2018 haben Sie ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördertes Forschungsprojekt mitgebracht, das den Titel trägt: „Zur Revision rationaler Überzeugungen beim rechtlichen Schließen: Anfechtbarkeit, Gegenbeispiele und Wahrscheinlichkeiten“. Worum geht es bei diesem Vorhaben?

Dieses Projekt war eingebettet in das mittlerweile beendete DFG-Schwerpunktprogramm 1516 „New Frameworks of Rationality“, ein multidisziplinäres Unternehmen zur Erforschung der Rationalität aus diversen Fachperspektiven heraus. Beteiligt waren vornehmlich Fachphilosophen, insbesondere Logiker, sowie Psychologen, ferner Informatiker. Das von Ihnen genannte Projekt, das federführend von dem Gießener Kognitionspsychologen Markus Knauft betreut wird und sich mit der Rationalität juristischen Abwägens und Schließens befasst, läuft aus organisatorischen Gründen bis Ende 2021 weiter. Meine Aufgabe als Co-Leiter bestand zunächst vornehmlich darin, das juristische Setting der kognitionspsychologischen Experimente sicherzustellen. Es ging uns darum, die Rationalität von Juristinnen und Juristen auf einen psychologischen Prüfstand zu stellen – nicht zuletzt unter dem Aspekt, was die Rationalität juristischer Argumentationen ausmacht und wo sie an ihre Grenzen stößt.

Könnten Sie dafür ein Beispiel nennen?

Juristische Argumentationen müssen den Gesetzen der Logik folgen. Eine unlogische Begründung eines Urteils ist nicht nur irrational, sondern auch rechtlich fehlerhaft. Der Prozess der Findung des Urteils aber ist nicht in gleicher Weise an Logik gebunden. Tatsächlich lassen kognitionstheoretische Erkenntnisse vermuten, dass hier andere Mechanismen der Rationalität am Werk sind. Der Frage, welche es sind, haben wir uns über psychologische Experimente zur Beurteilung von Tötungsdelikten genähert, die wir mit fortgeschrittenen Jura-Studierenden einerseits und Studierenden anderer Fächer, also juristischen Laien, andererseits durchgeführt haben: Alle Testpersonen erkannten die Regel „Straftäter müssen bestraft werden“ als solche an. Sie wendeten diese Regel jedoch sehr ver-

schieden hinsichtlich bestimmter Umstände an, von denen die Art und Dauer der Strafe abhängig gemacht werden könnte. Im Gegensatz zu den juristisch vorgebildeten Teilnehmern waren die Laien etwa bereit, auch Umstände weit außerhalb des Tathergangs – beispielsweise sexuelle Missbrauchserfahrungen durch einen Dritten in der Kindheit – als relevant für die Strafbarkeit anzuerkennen. Signifikante Unterschiede zeigten sich auch hinsichtlich der Strafwürdigkeit von Vergehen: Testpersonen mit juristischer Vorbildung befanden Tötungsdelikte, Kindesmissbrauch und Steuerhinterziehung unterschiedslos für strafwürdig, wenn auch mit unterschiedlichem Strafraumen, juristische Laien hielten die Bestrafung von Steuerhinterziehern für weniger wichtig. Darin zeigte sich ein Ergebnis, das mich noch immer beschäftigt: Schon nach wenigen Semestern juristischer Ausbildung scheint sich der moralische Kompass signifikant zu verändern. Ich habe den Eindruck, dass der allgemein-gesellschaftliche moralische Kompass im rechtswissenschaftlichen Studium rasch durch einen juristischen überlagert wird. Aber dies muss noch weiter erforscht werden.

Was folgt daraus für die Rationalität juristischer Argumentationen?

Für die Rationalität der juristischen Entscheidung heißt das, dass Juristinnen und Juristen offenbar eher bereit sind, gegebene Regeln regelkonform, das heißt deduktiv anzuwenden. Sie hinterfragen weniger die aus moralischen oder anderen Normen folgende Richtigkeit der rechtlichen Regeln, sie verstehen sich vielmehr als Rechtsanwender. Das kann zunächst beruhigen, es hat aber auch Schattenseiten – die sich spätestens dann zeigen, wenn das geltende Rechtssystem moralisch verkommen ist. Diskutiert wird dies in der Rechtsphilosophie bis heute hinsichtlich der Frage, ob die Juristen in der NS-Zeit dem Recht den Gehorsam hätten verweigern müssen. Diese Frage wiederholte sich nach 1990 in den Mauerschützenprozessen, und sie zeigte sich vor wenigen Jahren im Fall der Standesbeamtin Kim Davis in den USA, die aus moralischen, genauer: religiösen Gründen den gesetzlich gebotenen Eheschluss eines gleichgeschlechtlichen Paares nicht vollziehen wollte. Kurzum: Das Verhältnis von Moral und Recht zählt zu

den Kernfragen der Rechtsphilosophie. Unsere Experimente eröffnen darauf eine neue Perspektive.

Nicht zuletzt die Covid-19-Pandemie und ihre Folgen – von den Lockdowns bis hin zu den Diskussionen über eine Impfpflicht – haben deutlich gemacht, dass zwischen den Prinzipien „Freiheit“ und „Sicherheit“ oft ein unaufhebbares Spannungsverhältnis besteht. Haben Sie auch in dieser Hinsicht Unterschiede zwischen den Testpersonen feststellen können?

Nein, das war bislang nicht Gegenstand unserer Experimente. Allerdings versuchen wir gegenwärtig, die Rationalität von Abwägungsentscheidungen zu hinterfragen. Dazu ist ein Experiment entwickelt worden, in dem die Testpersonen – wiederum fortgeschrittene Jura-Studierende einerseits und juristische Laien andererseits – spezifische Konstellationen am Beispiel von Entscheidungen des Bundesverfassungsgerichts, in denen Grundrechtspositionen kollidieren, selbst abwägen sollen. Wir wollen die Ergebnisse dann mit den Abwägungen des Gerichts vergleichen. Auf die Unterschiede und Gemeinsamkeiten sind wir gespannt.

Welches sind aus Ihrer Sicht die wichtigsten, möglicherweise auch überraschenden Erkenntnisse, die sie im Rahmen Ihres DFG-Projekts gewonnen haben?

Die größte Überraschung für mich war die Erkenntnis, dass die Logik im Alltag des menschlichen Schließens eine eher untergeordnete Rolle spielt. Dies gilt naturgemäß auch für juristisches Schließen. Allerdings müssen juristische Schlüsse, anders als sonstige Entscheidungen von Menschen, im Nachhinein als logisch dargestellt werden können. Das hat, davon bin ich überzeugt, Auswirkungen auch auf die Entstehung der juristischen Entscheidungen. Ich erwarte, dass wir hinsichtlich der Abwägungen in der Rechtsanwendung zu ähnlichen Ergebnissen kommen werden. Wir brauchen eine logische Begründung der Abwägung, ähnlich der logischen Struktur der Subsumtion, die sie dem häufig geäußerten Vorwurf der Willkürlichkeit oder Irrationalität entziehen kann. Die Suche danach hat in der Rechtstheorie vor einiger Zeit begonnen, unsere Experimente könnten sie befördern.



■ Andreas Kögel

Der Tod ist sicher, das Sterben nicht

Eine soziologische Einordnung der Patientenverfügung

■ Wiederbelebungsversuch in der Notaufnahme eines Krankenhauses (Foto: ist).

Ungewissheit ist eng mit Unsicherheit verbunden. Beides wird in der Soziologie unter dem Begriff „Risiko“ bearbeitet. Unsicherheit ist danach kein Sonderfall, sie begleitet selbstverständlich jede Entscheidung. Im Alltagsverständnis ist der entsprechende Gegenbegriff die Sicherheit. Sicherheit existiert aber nur als Verheißung, denn jede Seite einer Entscheidung ist auf ihre Weise riskant. Sicherheit bleibt letztlich subjektiv, als Sicherheitserwartung oder Sicherheitsgefühl in der unmittelbaren Gegenwart. Die soziologische Systemtheorie entscheidet stattdessen zwischen Risiko und Gefahr.¹ Risiken werden auf die Entscheidungen des Subjektes zugerechnet, Gefahren kommen dagegen aus dessen Umwelt. Man entscheidet sich für eine von mehreren Optionen und riskiert, sich damit einer größeren Gefahr auszusetzen, als es bei der Entscheidung für eine andere Option der Fall gewesen wäre. Dies betrifft jeden gesellschaftlichen Bereich – und damit auch die Medizin und das Gesundheitswesen.

Risiken der Medizin im Wandel – Kontroversen um den Erhalt des Lebens

Die Risiken in der Medizin haben sich gewandelt, sind aber selbstverständlicher Bestandteil der Medizin geblieben. Vor dem Siegeszug der naturwissenschaftlich fundierten Medizin war es gleichermaßen riskant, zum Arzt zu gehen oder nicht, man denke an traditionelle, überwiegend schädliche Praktiken wie den Aderlass bei Infektionskrankheiten. Erst im 19. Jahrhundert haben sich die Verhältnisse so verschoben, dass es eindeutig riskanter wurde, bei gravierenden Beschwerden nicht zum Arzt zu gehen. Heutzutage überwiegen insgesamt die Vorteile medizinischer Behandlungen, doch es gibt auch Nachteile: Häufige oder seltene Nebenwirkungen, Übertherapie und die unerwünschte Verlängerung oder Verstetigung einer Leidensphase.

Ein Symbol für die Möglichkeiten moderner Technik in der Medizin, aber auch für ihre Kehrseite, ist die Intensivstation mit ihrem beeindruckenden, nicht selten auch beängstigenden Gerätepark. Sie kann den geschwächten Körper zeitweilig über Krisen hinweg retten, dann ist sie eindeutig vorteilhaft. Sie kann aber auch ein nicht mehr abzuwendendes Sterben hinauszögern und die biologischen Funktionen desolater Körper aufrecht erhalten.² In der Alltagswahrnehmung ist das Sterben an Maschinen, Kabeln und Schläuchen eine Art moderner Vorhölle, welche die meisten Menschen vermeiden wollen. Die medizinischen Akteure tendieren aber dazu, im

Zweifelsfall zu behandeln: Sie fühlen sich rechtlich auf der sicheren Seite; ganz grundsätzlich vermittelt Handeln Situationskontrolle, selbst dann, wenn nicht mehr viel getan werden kann. Entsprechendes gilt auch für die Betroffenen und ihre Angehörigen, und so kommt die Sterbende bei einer Krise dann doch in die Klinik, und meistens stirbt sie dann dort, obwohl keiner es so gewollt hatte. Und das muss nicht einmal die schlechtere Option sein, denn auch die Erwartungen an ein Sterben zu Hause sind oft romantisch verklärt. Die Furcht bezieht sich ja nicht auf die vorübergehende Einweisung, sondern auf einen längeren, endgültigen Verbleib. Die Gegebenheiten in der Klinik provozieren eben die Weiterbehandlung, und so kann es passieren, dass Patienten auch in aussichtslosen Situationen wiederbelebt, operiert, beatmet oder über eine PEG-Sonde ernährt werden.

Die technischen Möglichkeiten sind so weit fortgeschritten, dass Menschen, die vor wenigen Jahrzehnten innerhalb kurzer Zeit verstorben wären, noch wochen-, monate- oder vereinzelt sogar jahrelang am Leben erhalten werden können. Was das Leben eines Menschen ausmacht und wann genau er tot ist oder noch lebt, erhält neue Facetten und wird kontrovers diskutiert – man denke an den Hirntod als Todeskriterium für die Transplantationsmedizin. Je nach medizinischer Tradition und je nach Weltanschauung der Beobachtenden kann ein und derselbe Zustand unterschiedlich gedeutet und bewertet werden. Was die Einen als Lebensrettung bezeichnen, ist für die Anderen quälende Sterbeverlängerung. Es gab viele Fälle von Patienten im Wachkoma, um deren Schicksal jahrelange Rechtsstreitigkeiten zwischen Angehörigen untereinander oder zwischen Angehörigen und Leitungen von Pflegeeinrichtungen geführt wurden. Jedes Mal ging es dabei um die Frage, ob eine Lebenserhaltung eingestellt oder fortgeführt werden müsse.³

Wozu dienen Patientenverfügungen?

Die Stabilisierung vitaler Körperfunktionen mit Maschinen ist rechtlich gesehen eine Behandlung und kann grundsätzlich von den Betroffenen abgelehnt werden. Diese Möglichkeit greift jedoch nicht, wenn sich die Betroffenen vor und während der Behandlung in einem Zustand fehlender oder verminderter Einwilligungsfähigkeit befinden. Für solche Situationen sind Patientenverfügungen oder Vorsorgevollmachten gedacht.⁴ Mit einer Patientenverfügung wird die eigene Autonomie und Entscheidungsfähigkeit in die Zukunft projiziert – für den Fall, dass



■ Abb. 1: Intensivmedizinische Pflege (Foto: ist).

LITERATURTIPPS

Andreas Kögel: Medizin und Gesellschaft. Eine Einführung in die Medizinsoziologie. Stuttgart 2021.

Andreas Kögel: Tod und Sterben als Risiken. Münster 2016.

Gerd Gigerenzer: Risiko. Wie man die richtigen Entscheidungen trifft. München 2013.

Niklas Luhmann: Soziologie des Risikos. Berlin 1991.

keine unmittelbare persönliche Entscheidungsfähigkeit mehr gegeben ist. Mit einer Vorsorgevollmacht wird die Entscheidungsgewalt an ausgewählte Personen übertragen, die Kontrolle wird abgegeben, aber zugleich wird der Handlungsspielraum eingegrenzt. Ziel ist stets eine weitgehende oder zumindest teilweise Kontrolle über das zukünftige eigene Sterben. Wer eine Patientenverfügung verfasst, setzt unter gedanklicher Vorwegnahme einer eigenen psychischen Abwesenheit Regeln oder Rahmenbedingungen, die beim tatsächlichen Eintritt dieses Ernstfalls sicherstellen sollen, dass Behandlungsentscheidungen nicht gegen eigene Wünsche und Interessen getroffen werden.

Daher wird mit einer Patientenverfügung auch Misstrauen gegenüber dem Entscheidungsverhalten der Anderen kommuniziert. Und dies ausgerechnet gegenüber Instanzen, die grundsätzlich völliges Vertrauen für sich beanspruchen: Angehörige, Ärztinnen, Juristen und Geistliche. Paradoxerweise setzt die Patientenverfügung aber wiederum ein übergeordnetes Vertrauen (Systemvertrauen) voraus, vor allem in die Justiz – man vertraut darauf oder hofft zumindest, dass sie respektiert und durchgesetzt wird. Die Etablierung der Patientenverfügung durch die gesetzliche Regelung 2009 stieß im Vorfeld auf einige Ablehnung. Die teils ethischen, teils pragmatischen Hauptargumente haben sich bis heute nicht geändert: Man könne – oder dürfe – die Zukunft nicht vorwegnehmen; eine zukünftige Behandlung werde verkompliziert und bürokratisiert; die Patientenverfügung sei notorisch lückenhaft und unpassend, weil sie nicht alle Eventualitäten vorwegnehmen könne. Der Einwand, dass durch die Verfügung nur eine scheinbare Sicherheit vermitteln werde, trifft allerdings nicht: Auch das bloße Sicherheitsgefühl verbessert die aktuelle Lebensqualität und ist damit ein Mehrwert. Häufig werden auch Zweifel geäußert, die in der Verfügung enthaltenen Festlegungen würden im Ernstfall nicht der aktuellen Haltung der Person entsprechen, die sie verfasst hat. Auch dieser Einwand greift in der Regel nicht – denn wenn eine Person ihre Haltung im Ernstfall ändern kann, ist sie entscheidungsfähig und kann ihre Verfügung revidieren.

Es darf nicht vergessen werden, dass eine Patientenverfügung in jede Richtung gehen kann. Es kann nicht nur die völlige Unterlassung oder der Abbruch einer Behandlung gefordert, sondern auch eine Präferenz für weitestmögliche Lebenserhaltung formuliert werden. Die Motive können sehr unterschiedlich sein: Patientin A hängt einer christlichen



Leidensmystik an und könnte Angst davor haben, dass nichtspirituelle Angehörige oder Ärzte sie vorschnell sterben lassen. Im Gegenzug könnte der Atheist B Angst vor katholischen Angehörigen oder Ärztinnen haben, die das Lebensende immer weiter hinauszögern, weil sie in keiner Weise den Grundsatz eines absoluten Lebensschutzes verletzen und dadurch Schuld auf sich laden wollen. Patient C mag befürchten, dass er aus Gründen der Kostenersparnis oder der Transplantationsfähigkeit seiner Organe bei der erstbesten Gelegenheit aufgegeben wird – denn ein Organspendeausweis ist, rechtlich gesehen, eine Art Patientenverfügung. Patientin D schließlich fürchtet einzelne nahe Verwandte, die es vielleicht nicht schaffen werden, loszulassen und auf lebenserhaltende Maßnahmen drängen – unterstützt und bestätigt von einer Klinikabteilung, die damit Geld verdienen kann.⁵

Die Patientenverfügung erfüllt verschiedene Funktionen

- *Instrumentell:* Handlungs- bzw. Entscheidungsrichtlinien für bestimmte medizinische Situationen. Betonung der eigenen Präferenzen zum Zeitpunkt der Abfassung der Verfügung. Schutz vor Angehörigen oder Klinikpersonal mit anderen Prinzipien oder Interessen.

- *Soziale Entlastung:* Für Angehörige und Klinikpersonal werden Tabus aufgehoben oder abgeschwächt: „In dieser oder jener Situation dürft ihr mich ohne schlechtes Gewissen sterben lassen.“ Der Einwand „aber wir können doch Ihren Angehörigen nicht verhungern/verbluten lassen“ wird außer Kraft gesetzt. Oder umgekehrt die Bekräftigung, dass man unbedingt Weiterleben möchte, auch wenn es nur unter starken Einschränkungen möglich sein wird.

AUTOR

Dr. Andreas Kögel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Soziologie der Universität Bayreuth im Bereich Methoden der empirischen Sozialforschung.





Klärungsprozesse unter dem Zeitdruck des Ernstfalls und vielleicht auch Auseinandersetzungen mit anderen Beteiligten.

■ *Abb. 2: High-Tech-Medizin: Überprüfung der von einer Herz-Lungen-Bypass-Maschine übermittelten Daten (Foto: ist).*

Entscheidungen trotz Ungewissheit: Riskant, aber unausweichlich

Gemäß der Soziologie des Risikos ist Sicherheit subjektiv und beobachterabhängig. Das Subjekt trifft eine Entscheidung und fühlt sich damit sicher oder nicht. Wer diese Person von außen beobachtet, kalkuliert vielleicht anders und kritisiert deren Entscheidungen als irrational. Aber niemand hat alle für eine Entscheidung relevanten Informationen, und so müssen wir trotz Ungewissheit Entscheidungen treffen, die nicht mehr revidierbar sind – beispielsweise bei der Wahl von Bildungswegen, Lebenspartnern, Geldanlagen, Tätowierungen. Sicherheit ist letztlich das gegenwärtige, beruhigende Gefühl, die richtige Entscheidung getroffen zu haben.

■ *Politische Kommunikation:* Äußerung des Unbehagens über gesundheitsökonomische Fehlentwicklungen bis hin zu konkretem Misstrauen – gegenüber den Motiven von Ärztinnen und Angehörigen oder der Eigendynamik der organisierten Krankenbehandlung. Die Befürchtungen können vielfältig sein: Oft geht es um ökonomische Anreize oder ärztlichen Ehrgeiz, im Einzelfall kann man darin gleichermaßen Motive für unnötige Lebenserhaltung oder für vorzeitige Aufgabe sehen.

■ *Weltanschauliche Positionierung:* Schutz vor Angehörigen oder Klinikpersonal mit anderen moralischen Prinzipien.

Die Patientenverfügung ist letztlich ein selbstverständlicher Schritt im Rahmen des Empowerment, und ihre Zurückweisung durch einige – beileibe nicht alle! – Professionelle eine Abwehrreaktion (die Psychoanalyse würde von einer narzisstischen Kränkung sprechen). Den Verfasserinnen fehlt das Vertrauen, dass die direkt Involvierten gegebenenfalls in ihrem Sinne entscheiden oder dass sie im Konfliktfall zu einer gütlichen Einigung kommen werden; daher werden Richtlinien oder konkrete Regeln verfügt. Grundsätzlich werden sogar die Selbstbeschreibungen der adressierten Instanzen bezweifelt: das ärztliche Vermögen („Die moderne Palliativmedizin kann jedes Leiden lindern oder gar verhindern“) und das Primat des Patientenwohls bzw. der Patienteninteressen. Gegenüber Geistlichen oder gläubigen Angehörigen deren Vertrauen auf Gott oder ein gnädiges Schicksal („Alles hat seinen tieferen Sinn, auch das Leid, und am Ende wird alles gut werden“). Im Gegenzug kann eine Patientenverfügung von Angehörigen und Teilen des Klinikpersonals auch als Erleichterung empfunden werden – es wird immer Situationen geben, in denen eine Entscheidung für die Beteiligten schwierig ist. Klar formulierte Präferenzen ersparen

„Ziel ist stets eine weitgehende oder zumindest teilweise Kontrolle über das zukünftige eigene Sterben.“

Im deutschen Gesundheitswesen sind Patientenverfügungen heute eine etablierte Option. Jeder muss dazu eine Entscheidung treffen, und die ist nach beiden Seiten hin riskant. Wer sich für die Abfassung einer Verfügung entscheidet, riskiert, dass diese im Ernstfall nicht zur Situation passt; wer darauf verzichtet, riskiert es gegen seine Interessen behandelt (oder auch nicht behandelt) zu werden. Und immer gibt es die Möglichkeit, dass sich die eigene Haltung ändert und man mit einer früheren Entscheidung hadert. Sogar das spätere Bereuen kann man in der Gegenwart antizipieren: „Hätte ich doch nur“ oder „hätte ich nicht“. Wer in dieser Möglichkeit des späteren Bereuens ein Problem sieht, kann der Entscheidung gleichwohl nicht ausweichen. Nur in wenigen abgrenzbaren Bereichen des Lebens kann man gegenüber sich selbst so tun, als verzichte man angesichts von Ungewissheit auf eine Entscheidung, und daraus ein Sicherheitsgefühl beziehen. Die Patientenverfügung gehört aber nicht mehr dazu.

- 1 N. Luhmann: Soziologie des Risikos. Berlin 1991.
- 2 Zum Beispiel von M. de Ridder: Wie wollen wir sterben? Ein ärztliches Plädoyer für eine neue Sterbekultur in Zeiten der Hochleistungsmedizin. München 2010. Ebenso kritisch: M. Thöns: Patient ohne Verfügung. Das Geschäft mit dem Lebensende. München/Berlin 2016.
- 3 Prominent der Fall Teri Schiavo, ähnliche Fälle in Deutschland werden z. B. bei de Ridder 2011 und Thöns 2016 angeführt (s. Anm. 2).
- 4 Ausgeblendet wird hier der etwaige soziale Druck auf Betroffene zugunsten einer Weiterbehandlung, die Patientenverfügung greift hier nicht.
- 5 vgl. die Vorwürfe von Thöns 2016 (s. Anm. 2).



POLITIK IN DER PANDEMIE

■ Eckhard Nagel

Irrtums- fähigkeit und Verantwortung

Zum Verhältnis von
Politik und Wissenschaft

■ Oben: Blick in den Plenarsaal des Deutschen Bundestags (Foto: Steffen Präßdorf / wikimedia commons / CC-BY-SA-4.0).
Unten: Mikroskopische Untersuchungen im Zusammenhang mit der Covid-19-Pandemie (Foto: ist).

Die zurückliegenden Monate waren gekennzeichnet durch einen zum Teil heftigen Streit darüber, wer angesichts der Unsicherheit über den Verlauf und die Bedeutung der Covid-19-Pandemie Entscheidungen vorbereiten, treffen und verantworten sollte. Dabei hat sich eine enge, sicher notwendige Kooperation zwischen Wissenschaft und Politik ergeben, die bildlich in den regelmäßigen Pressekonferenzen des Robert Koch-Instituts in Anwesenheit des Bundesgesundheitsministers im Gedächtnis bleiben wird. Problematisch an diesem Bild ist die Beziehung, die zwischen dem Präsidenten des Robert Koch-Instituts, Professor Lothar Wieler, und dem Mitglied der Exekutive, Minister Jens Spahn, besteht: Er ist Dienstherr und Vorgesetzter des Leiters dieser wissenschaftlichen Bundesbehörde. Daraus abzuleiten, dass Wissenschaft hier in einer abhängigen Position steht, ist nicht nur falsch, sondern widerspricht auch unserem grundgesetzlich geschützten Verständnis der Freiheit von Wissenschaft und Forschung.

Andere mögen sich im Hinblick auf das Zusammenspiel von Wissenschaft und Politik daran erinnern, dass in den verschiedensten Medien Wissenschaftler*innen ultimativ Forderungen an die Politik gestellt haben und dabei postulierten, dass – wenn diese nicht zügig umgesetzt würden – nicht nur Politikversagen die Folge sei, sondern viele Bürger*innen lebensgefährlich bedroht würden. Die öffentliche Aufregung hat dazu beigetragen, dass in diesen Situationen politisch Verantwortliche in die Defensive geraten sind. Bisweilen war auch widersprüchliches politisches Handeln die Folge, um den Preis eines Vertrauensverlustes in der Bevölkerung.

Beide Bilder machen deutlich, dass in den Monaten der Pandemie das Beziehungsgeflecht zwischen Wissenschaft, öffentlicher Meinung und Politik sich sehr heterogen und ambivalent entwickelt hat. Am Anfang waren die Blicke sehr konzentriert und zuversichtlich auf erste wissenschaftliche Erkenntnisse gerichtet, die die Bemühungen unterstützt haben, in den medizinischen Institutionen das Leben schwer erkrankter Menschen zu retten. Diese positivistische Grundeinstellung der Wissenschaft gegenüber ist jedoch danach schrittweise erodiert. Gleiches gilt für das Vertrauen in die politisch verantwortlich Handelnden und ihre Fähigkeit, aus dem jeweiligen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis eine nachvollziehbare und konsistente Handlungsvorgabe zu beschließen. Das Resultat war ein Streit, der speziell mit Blick auf die Wissenschaft die Frage in den Mittelpunkt stellte, ob eine vornehmlich intellektuelle, auf

großem Detailwissen basierende Herangehensweise an die individuellen und gesellschaftlichen Probleme der Pandemie nicht besser zur Problemlösung führen könnte als die Handlungsvorgaben von Spezialisten im Bereich der Politik. So wurde der Streit zwischen Gegnern und Befürwortern sogenannter Corona-Maßnahmen zu einem Streit über den Stellenwert der Wissenschaft selbst, über Wissenschaftskommunikation und über das Verhältnis von Politik und Wissenschaft.

In diesem Zusammenhang erlaubte Bundeskanzlerin Angela Merkel im Dezember 2020 einen überraschend persönlichen Einblick in ihren inneren Kompass während der Generaldebatte zum Haushalt 2021 im Deutschen Bundestag. Sie erläuterte zur Wahl ihres Studienfaches: *Physik habe sie studiert, um Orientierung zu gewinnen. In einem Land, in dem die Realität immer abhängig war von der Interpretation der Mächtigen, sei das Studium der Naturgesetze eine entscheidende innerliche und inhaltliche Positionierung gewesen: die Gravitationsgesetze, die Prinzipien der Erdanziehung und der Lichtgeschwindigkeit ließen sich nun einmal nicht uminterpretieren.*

Verunsicherung und schwindendes Vertrauen

Während sich daraus eine enge Verbindung zwischen wissenschaftlicher Erkenntnis und politischem Handeln ableiten ließe, gehen viele Kommentatoren mit der Politik hart ins Gericht: Entscheidungen seien zu spät getroffen, wissenschaftliche Erkenntnisse nicht richtig interpretiert, wichtige Zeit verschlafen worden. Unter der Überschrift „Mit dem Latein am Ende – Die Politik hat fertig“ brachte ein Kommentar dies im Deutschlandfunk auf den Punkt: Vielfältige Fehleinschätzungen, unsicheres Agieren, Verantwortung für öffentliche Verwirrung und weitere Unzulänglichkeiten im Umgang mit der Pandemie charakterisierten die Politik. Zwischen dem Bekenntnis zum Vertrauen in die Wissenschaft und den Handlungen in der politischen Tiefebene bestünden gravierende Brüche, die letztlich nur eine Schlussfolgerung zulassen würden: Die Empfehlungen der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina zum aktuellen Infektionsgeschehen und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen für Handlungen im öffentlichen Raum seien begründet und basierten auf klaren wissenschaftlichen Analysen. Die Politik habe fertig und es sei an der Zeit, dass die Virologen wenigstens für einen gewissen Zeitraum die Regierungsgeschäfte übernehmen sollten, damit wieder



■ Abb. 1: Bundeskanzlerin Angela Merkel im Dezember 2015 in Karlsruhe (Foto: Olaf Kosinsky / Skillshare.eu / wikimedia commons).



Stringenz in die Handlungen und Ruhe in das Land kämen.

„Irrtumswahrscheinlichkeit ist ein Charakteristikum der Wissenschaft. Wir müssen sie in unser Verhältnis zur Politik integrieren, wenn die Vernunft handlungsleitend bleiben soll.“

■ Abb. 2: Hauptgebäude der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften in Halle (Saale) (Foto: Gunther Tschuch PaulT / wikimedia commons).

In der gegebenen Situation mochten solche Äußerungen auf ein gewisses öffentliches Verständnis stoßen: Es zeichnete sich die sogenannte dritte Welle der Pandemie mit einer Vielzahl neuer Infektionen ab, das Risiko für die weitere Verbreitung des Virus innerhalb Deutschlands stieg ständig, und damit wuchs die Sorge, dies könne gegebenenfalls zu der Notwendigkeit einer Priorisierung von Behandlungsmaßnahmen gerade auf den Intensivstationen führen. Beim Autor dieses Beitrags hat dieser Kommentar allerdings nicht nur Kopfschütteln, sondern auch innere Widerstände erzeugt.

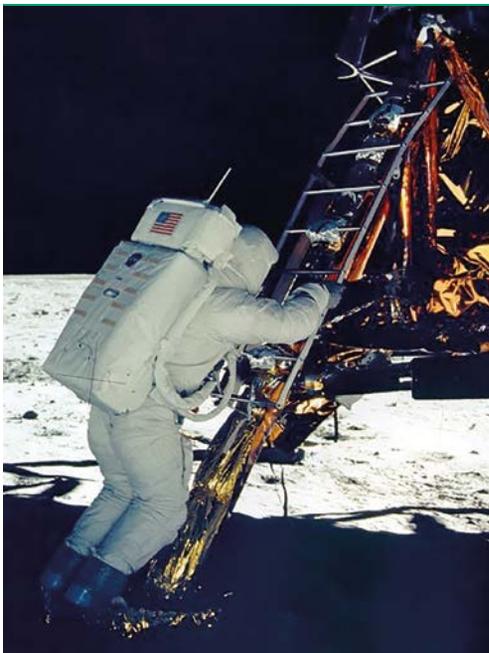
Sicher: Ungewöhnlich prominent haben wir in den meisten westlichen Industrieländern seit Ausbruch der Pandemie über die Bedeutung der Wissenschaft für die Entwicklung und das Wohlergehen unserer Gesellschaften diskutiert. Der direkte Zusammenhang wissenschaftlicher Erkenntnisse mit dem Schutz von Leib und Leben hat zu einer Emotionalisierung der Debatte geführt, deren Leidenschaftlichkeit und Ernsthaftigkeit auf den ersten Blick für einen Wissenschaftler positiv zu bewerten ist. Das liegt daran, dass wir im zurückliegenden Jahrzehnt ein deutliches Misstrauen gegenüber wissenschaftlichen Erkenntnissen feststellen mussten, besonders wenn diese mit wirtschaftlichen oder politischen Zielen kollidierten, zum Beispiel beim Klimawandel. Vielen dürften die scharfen Angriffe des ehemaligen U.S.-amerikanischen Präsidenten Donald Trump noch nachklingen, der Wissenschaftler*innen als unamerikanisch und verschwörungstheoretisch belastet dargestellt hat, weil sie die Reduktion klimaschädlichen CO₂-Ausstoßes als unabdingbar für ein planetares Klimagleichgewicht formuliert hatten. Sie widersprachen damit politischen und wirtschaftlichen Zielen der US-Administration und wurden nicht nur inhaltlich, sondern auch persönlich angegriffen, ohne dass es dafür anderer wissenschaftlicher Arbeiten oder Erkenntnisse bedurft hätte. Manche werden sich zudem an den *March for Science*, die weltweiten Demonstrationen für die Bedeutung der wissenschaftlichen Forschung, erinnern: Sie waren der Ausdruck einer Verunsicherung, die auch die Organisationsstrukturen und innere Verfasstheit der Wissenschaft betraf, und ließen deutlich die Sorge erkennen, wir Menschen könnten uns von dem verabschieden, was uns nicht erst seit der kritischen Philosophie Kants auszeichnet: dem Gebrauch der Vernunft zur Gestaltung unserer Lebenswelten.



■ Abb. 3: March for Science im April 2017 in Berlin (Foto: Heike Mewis / wikimedia commons)

Bis heute wirksam: das Humboldt'sche Bildungsideal

Diese Entwicklung ist umso irritierender, als die Fortschritte in Technik und Naturwissenschaften, in Geistes-, Kultur- und Sozialwissenschaften unser Leben in den zurückliegenden 60 Jahren so umfassend revolutioniert haben wie niemals zuvor. Die eine oder der andere mag sich noch an das Ende der 1960er Jahre erinnern. Damals begründeten zwei in wirklicher Ferne stattfindende Ereignisse den Beginn eines Wissenschaftspositivismus, der keineswegs in den Gebäuden ehrwürdiger Universitäten stecken blieb, sondern seinen Weg in die Wohnzimmer von Millionen von Menschen durch das damals noch recht unscharfe Schwarzweiß-Bild des Fernsehers fand: Die Mondlandung und der kleine Schritt von Neil Armstrong, der zu einem großen für die Menschheit wurde, sowie die erste Herztransplantation ein Jahr zuvor in Südafrika. In beiden Fällen handelte es sich um erstmalig medial begleitete, in wissenschaftlichen Entwicklungen begründete Ereignisse, von denen niemand so richtig einschätzen konnte, was sie mit einem selbst zu tun haben mochten. Dennoch verbreitete sich ein ermutigendes Gefühl bis in die Schulklassen: Hier war etwas gelungen, das im Prinzip alle Menschen positiv beeinflussen würde.



Mancher mag einwenden, dass in diese Wahrnehmung viel Naivität und noch mehr Emotionalität eingeflossen sind. Beides ist per definitionem in der Wissenschaft fehl am Platz. Aber sei's drum: Der Ent-

wicklung vieler Generationen junger Menschen, die sich aufgemacht haben, schulische und universitäre Abschlüsse anzustreben, um für das Gute in der Welt zu arbeiten, hat es nicht geschadet. Es kam zur Wiederbelebung einer öffentlichen Begeisterung für die Wissenschaft, wie sie einst Alexander von Humboldt zu erzeugen wusste. Wesentliche Grundlagen des von seinem Bruder Wilhelm entwickelten Bildungsideals machen bis heute das Fundament unseres Zusammenlebens aus. Forderungen nach Freiheit, nach Verantwortung und Moral, die auf der Überzeugung einer unveränderlichen Vernunft basieren, sind der Ausgangspunkt des wissenschaftlichen und universitären Denkens. Das haben Abiturient*innen wie Angela Merkel verinnerlicht und in dieser Tradition die Wahl ihres Studienfaches intuitiv oder bewusst getroffen.

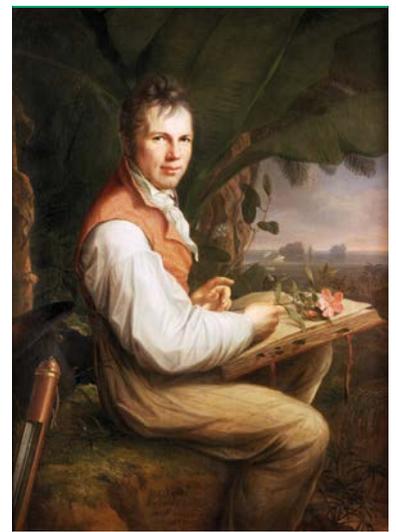
Wissenschaft und Forschung: frei, widerstandsfähig und neutral

Bei diesen Entscheidungen spielt es eine wichtige Rolle, welche Stellung der Wissenschaft nicht nur in der öffentlichen Wahrnehmung, sondern auch im Hinblick auf die Realisierung von Lebensplänen zukommt. Dies ist verbunden mit der Frage, ob Wissenschaft und Kunst uneingeschränkt einen Raum bilden, der äußerlichen Einflüssen gegenüber widerstandsfähig ist, oder ob Einschränkungen im Denken und im Handeln durch politische Repressalien auch diesen Raum verengen.

Wissenschaft und Kunst haben als geschützte Bereiche, wie sie heute in Deutschland im Grundgesetz verankert sind, eine zentrale Stellung in der Organisation des Gemeinwesens. Diese zentrale Stellung beruht auf dem Vertrauen, dass zur Ermittlung der Wahrheit ein ernsthaftes Bemühen in methodischer, systematischer und nachprüfbarer Weise Erkenntnisse hervorbringen wird, die zum Wohle Aller nutzbar und für diese förderlich sein werden. Diese Erwartungshaltung nimmt Bezug auf die von Max Weber dargelegte und begründete Neutralität der Wissenschaft. Er ging davon aus, dass wissenschaftliche Erkenntnis objektiv und damit wertfrei sei. Wissenschaft fällt also keine Urteile, wie sich die Welt gestalten sollte, sie beschreibt lediglich, wie die Welt ist. So wird auf dem Boden der Freiheit der Weg zum Erkenntnisgewinn der Wissenschaft aufgezeigt. Dies geschieht im unbedingten Vertrauen auf die Vernunft unter dem Postulat der Neutralität. Gegenüber persönlichen Interessen und individuellen Begehrlichkeiten ist Wissenschaft weitestgehend



■ Abb. 4: Standbild von Immanuel Kant in Kaliningrad, Nachbildung der im Zweiten Weltkrieg verlorengegangenen Skulptur von Christian Daniel Rauch (1777-1857) (Foto: wikimedia commons).



■ Abb. 5: Porträt von Alexander von Humboldt aus dem Jahr 1806 von Friedrich Georg Weitsch (1758-1828) (Foto: Karin März / wikimedia commons).

■ Abb. 6: Die erste Mondlandung im Dezember 1968: Buzz Aldrin verlässt die Landefähre von Apollo 11 (Foto: NASA / wikimedia commons).

immun. Dies gilt auch, wenn der Ursprung der Forschungsfrage bereits eine mögliche Nutzbarkeit der Ergebnisse im Auge hat, wie zum Beispiel bei der Erforschung eines Impfstoffes oder den epidemiologischen Regeln zur Strukturierung innerhalb einer Pandemie.

■ Abb. 7: Max Weber, Photographie aus dem Jahr 1918 (Foto: wikimedia commons).



Max Weber hat zudem der Wissenschaft mahndend ins Stammbuch geschrieben, auch politisch neutral zu bleiben. Wie schwierig eine politische Neutralität zum Beispiel für ein die Politik beratendes wissenschaftliches Gremium ist, ließ sich in den letzten beiden Jahrzehnten an der Etablierung des Nationalen und später Deutschen Ethikrates nachvollziehen. Aufgeheizt durch die Diskussion um die moralischen Grenzen wissenschaftlicher Entwicklung am Beispiel der embryonalen Stammzellforschung hatte Bundeskanzler Gerhard Schröder 2001 ein Gremium zusammengerufen, das die ethische Entwicklung in den Lebenswissenschaften aufzeigen und der Gesellschaft gegenüber verständlich darstellen sollte. Die mediale Aufmerksamkeit verkürzte sich dabei auf die Frage, ob es bezüglich bestimmter Positionen Mehrheiten und Minderheiten innerhalb des Gremiums gäbe. Es war ein langer und mühsamer Prozess, der Öffentlichkeit gegenüber verständlich zu machen, dass Wissenschaft Neutralitätsgeboten zu folgen habe und dass ein Gremium, auch wenn es von der deutschen Bundesregierung oder dem Deutschen Bundestag eingesetzt wird, nicht deren Aufgaben übernehmen könne oder solle.

Im Dialog zwischen Wissenschaft und Politik besteht der Auftrag darin, die wissenschaftlichen Argumente für eine spezifische Fragestellung in ganzer Bandbreite und gegebenenfalls auch Widersprüchlichkeit zusammenzutragen, sie nachvollziehbar zu erklären und mit den möglichen Schlussfolgerungen, die bei unterschiedlicher Gewichtung von Argumenten selbstverständlich unterschiedlich ausfallen können, die Politik zu unterstützen. Politische Entscheidungen sollen dann ihrerseits dem Gewissen folgen, nicht ausschließlich dem Wissen. Daraus begründet sich die Akzeptanz von Mehrheitsentscheidungen.

Vernetzungen von Wissenschaft und Gesellschaft

Im Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft ist es zudem wesentlich, die Grundzüge der wissenschaftlichen Methodik zu verstehen, die sich häufig am Experiment orientiert und ihre Ergebnisse nicht selten durch die Falsifizierung von Ansätzen findet. Selten und nur in wenigen Fachgebieten liegen so eindeutige Gesetzmäßigkeiten vor, dass diese als Naturgesetze bezeichnet werden und sich als Basis zuverlässiger Prognosen immer wieder bewähren. Dazu zählt die Physik, und davon hat Angela Merkel gesprochen. Anders verhält es sich zum Beispiel in den Wirtschaftswissenschaften und der Medizin. Hier werden Vorhersagen fortlaufend korrigiert und weiterentwickelt. Viele Menschen kennen die Situation, dass klinische Befunde nicht eindeutig sind oder dass vorgeschlagene Therapiewege nicht immer zum Erfolg führen. Das unterscheidet die Wirtschaftswissenschaften oder die Medizin von der Physik.

An dieser Stelle finden wir uns erneut in der Generaldebatte des Deutschen Bundestages im Dezember 2020 wieder. Die dort vorgetragenen Argumente haben in der einen wie in der anderen Richtung das Vertrauen in die Wissenschaft nicht gestärkt. Die Biologie und die auf ihr beruhende Medizin sind vom Prinzip her nur ansatzweise mit der Physik vergleichbar. Darum hätte das Studium der Humanmedizin für die Abiturientin Angela Merkel auch keine Orientierung geben können, so wie sie sich das von der Physik erhofft hat. Und deshalb sind auch Empfehlungen von exzellenten Wissenschaftler*innen aus verschiedenen Disziplinen keine Naturgesetze, auf denen aufbauend politische Handlungen stringent und mit großer Planungssicherheit kalkuliert werden könnten. Problematisch wird es daher, wenn wissenschaftliche Gremien konkrete Handlungen



■ Abb. 8: Blick in das Innere der Kuppel des Reichstagsgebäudes in Berlin (Foto: bluejayphoto / istockphoto.com).

empfehlen, die einer genuin politischen Begründung bedürfen. Entsprechend ist es ein Trugschluss zu glauben, ein Expertengremium könne bessere Entscheidungen treffen als die gewählten und zuständigen Politiker*innen. Diese Form des Wissenschaftsverständnisses gefährdet den Fortschritt, den selektiver Erkenntnisgewinn zur Unterstützung der politischen Entscheidungsfindung beitragen kann. Vor allem aber geraten Wissenschaft und Politik gleichermaßen in ein Rechtfertigungsdilemma, das mit einem Vertrauensverlust in der Öffentlichkeit einhergeht. Medizin ist nicht Physik. Eine Pandemie verhält sich nicht nach für uns fassbaren Naturgesetzen.

Die Menge der unbeantworteten Fragen im Hinblick auf das Geschehen, das uns seit Anfang 2020 begleitet, bleibt groß. Wissenschaft kann dazu beitragen, diese Fragen Stück für Stück aufzuklären und mit jeder Antwort wie bei einem Puzzle langsam ein Gesamtbild zu erzeugen. In der Zwischenzeit helfen die bereits gewonnenen Erkenntnisse, unser Leben in neu zu definierenden Regeln zu sichern und zu erhalten. Diese Regeln ändern sich natürlicherweise ständig, weil der Erkenntnisgewinn dies ermöglicht. Nur wenn die dadurch bedingte Unsicherheit und die Bandbreite der offenen Fragen nicht als Verlust von Autorität, sondern als natürlicher Rahmen menschlichen Handelns verstanden werden, kann deren Kommunikation dazu beitragen, die gesamtgesellschaftliche Verunsicherung zu beruhigen. Irrtumswahrscheinlichkeit ist ein Charakteristikum der Wissenschaft. Wir müssen sie in unser Verhältnis zur Politik integrieren, wenn die Vernunft handlungsleitend bleiben soll.

Der Beitrag der Bundeskanzlerin in der Generaldebatte des Bundestags kann und sollte somit verstanden werden als ein Plädoyer für die ethische und

politische Neutralität der Wissenschaft. Wer diesen Beitrag hingegen als Argumentation zur Unterordnung politischer Handlungsmöglichkeiten unter rationale Erkenntnisse versteht, die unvermeidlich einer hohen Volatilität unterworfen sind, wenn das Untersuchungsobjekt – wie im Fall der Corona-Pandemie – mit vielen Unbekannten ausgestattet ist, leistet Missverständnissen Vorschub, die am Ende sowohl der Politik wie der Wissenschaft schaden.

Fazit

Die dauerhafte Bewältigung der Pandemie hängt von vielen Faktoren ab: Es bedarf hervorragender multidisziplinärer wissenschaftlicher Expertise, um die aktuellen Fragestellungen zu beantworten. Es braucht eine differenzierte Wahrnehmung dieser Expertise auf Seiten der Politiker*innen, die daraus nachvollziehbare und stringente Handlungsempfehlungen ableiten. Dies ermöglicht eine Lösung der Gesamtsproblematik, bei der jeder und jede Einzelne unter den jeweils gegebenen Rahmenbedingungen Verantwortung übernimmt. Nur wenn es gelingt, eine kollektive Handlungsbereitschaft zu erzeugen – und das ist auch eine Aufgabe der Medien, die Wissenschaft und Politik begleiten – können übergeordnete Herausforderungen bewältigt werden.

AUTOR



Prof. Dr. Dr. med. habil. Dr. phil. Dr. theol. h.c. Eckhard Nagel ist Inhaber des Lehrstuhls für Medizinmanagement und Gesundheitswissenschaften sowie Geschäftsführer des Instituts für Medizinmanagement und Gesundheitswissenschaften (IMG) an der Universität Bayreuth.

Der Beitrag beruht auf einem Artikel des Verfassers, der am 20. Januar 2021 unter dem Titel „Warum Angela Merkel nicht Medizin studiert hat“ in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung erschien.



Charakteristisch und vieldeutig

Seit zwei Jahrzehnten beleben sie den Campus der Universität Bayreuth: die farbigen freistehenden Bronzeskulpturen von Stephan Balkenhol, einem der bedeutendsten deutschen Bildhauer der Gegenwart. Mit Ausstellungen in führenden Museen und Galerien hat sich der 1957 in Fritzlar geborene Künstler im In- und Ausland hohes Ansehen erworben. Seine charakteristischen, auf vielen öffentlichen Plätzen in Europa präsenten Skulpturen stehen in

keiner einzelnen bildhauerischen Tradition und porträtieren auch keine historischen Persönlichkeiten. Vielmehr zeigen sie allgemein menschliche Figuren mit individueller Ausstrahlungskraft, die bewusst viele Deutungsmöglichkeiten zulassen. „Meine Skulpturen erzählen keine Geschichten. In ihnen versteckt sich etwas Geheimnisvolles. Es ist nicht meine Aufgabe, es zu enthüllen, sondern die des Zuschauers, es zu entdecken“, sagt der Künstler über seine Bildwerke.