

Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2023



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Jahrbuch 2023

Braunschweigische
Wissenschaftliche Gesellschaft

Jahrbuch 2023



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2024

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2024

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Dieses Dokument unterliegt der Lizenz Open Access CC BY 4.0

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2024

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-68952-981-9

eISBN 978-3-68952-982-6

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	17
Organe der BWG seit Gründung	23
Neufassung der Satzung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft	25

NEUJAHRSSITZUNG

28.01.2023	in Braunschweig	
	<i>Otto Richter</i> : Begrüßung – Rückblick – Übergabe des Präsidentenamtes	43
	<i>Susanne Beck</i> : Maschinen außer Kontrolle? Wie wir KI durch Interdisziplinarität in unser Leben integrieren können?	
	<i>Reinhold Haux</i> : Erhalten und Erneuern, immer im Sinne der Ziele der BWG	49

PLENARVERSAMMLUNGEN

10.02.2023	in Braunschweig	
	<i>Michael Marschollek</i> : Die Medizininformatik-Initiative: Gesundheitsdaten besser nutzen	
10.03.2023	in Braunschweig	
	<i>Ulrich Menzel</i> : Das Eigene und das Fremde Revisited	57
28.04.2023	in Braunschweig	
	<i>Renate Stauf</i> : Literatur als Erkenntnis	
12.05.2023	in Braunschweig	
	<i>Holger Blume</i> : Applikationsspezifische Prozessoren für digitale Hörhilfen – Arbeiten aus dem Exzellenzcluster Hearing4all	
09.06.2023	in Clausthal	
	<i>Stefan Hartmann</i> : Additive Manufacturing: Challenges from manufacturing to process simulation with application to wire arc additive manufacturing	79
15.09.2023	in Braunschweig	
	<i>Jörg Overmann</i> : Die Bedeutung der unsichtbaren Biodiversität	

- 13.10.2023 in Hannover
Torsten Schlurmann: Zukunft Küste – Veränderung und Wirkungen des Meeresspiegelanstiegs im Küstenraum und
Nils Goseberg: NULIMAS – Bodenverflüssigung um marine Strukturen
- 10.11.2023 in Braunschweig
Matthias Tamm: Die Analyse der Luftzusammensetzung im Kontext wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Revolutionen 91
- 01.12.2023 in Göttingen
 Gemeinsame Sitzung mit der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen
Michael Marschollek: Offene Infrastrukturen für medizinische Daten
Jochen Steil: Mensch-Maschine Entscheidungen, Einige Schlaglichter aus der Arbeit der SYNENZ-Kommission
- 08.12.2023 in Braunschweig
 Wahlsitzung
Martin Korte: Holt die Therapie jemals die Alzheimer-Krankheit ein? 103

KLASSENSITZUNGEN

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

- 10.02.2023 in Braunschweig
Cornelia Lee-Thedieck: Stammzell-Material Wechselwirkungen
- 10.03.2023 in Braunschweig
Maren Schubert: Entwicklung eines Covid-19-Antikörpers: Vom Start in Insektenzellen bis hin zu klinischen Studien 115
- 12.05.2023 in Braunschweig
Felix Kaspar: Barrierefreie Farbgestaltung von Publikationen und Lehrmaterialien: Weil bunt nicht immer besser ist
- 15.09.2023 in Braunschweig
Philipp Klahn: Artificial glucosinolates – Mimicking nature’s design
- 10.11.2023 in Braunschweig
Ralf Mendel: Warum sterben wir an einem Effekt im Molybdän-Stoffwechsel?

Klasse für Ingenieurwissenschaften

- 10.02.2023 in Braunschweig
Karl-Heinz Rosenwinkel: Abwasser als Ressource?
- 10.03.2023 in Braunschweig
Steffen Schön: Geometrie und Quantentechnologie – Aspekte für verbesserte Navigationslösungen
- 12.05.2023 in Braunschweig
Niklas Freund, Dirk Lowke: Digitaler Beton – Kombinierte additive Fertigung für die Herstellung bewehrter Betonbauteile 127
- 15.09.2023 in Braunschweig
Udo Nackenhorst: Biomechanik der Knochen 137
- 10.11.2023 in Braunschweig
Hartmut Pasternak: Von Euler in die Moderne – einige Bemerkungen zur Stabilität im Stahlbau

Klasse für Geisteswissenschaften

- 10.02.2023 in Braunschweig
Ulrich Menzel: Braunschweig, Lübeck und die Hanse. Zwischen Kooperation und hegemonialer Ordnung
- 10.03.2023 in Braunschweig
Nils Baratella: Verantwortung und Distanz. Zur Aktualität Hanna Arendts
- 12.05.2023 in Braunschweig
Thomas Scharff: Häresie global. Mittelalterliche Vorstellungen der universalhistorischen Dimensionen von Ketzerei und Ketzern
- 15.09.2023 in Braunschweig
Regularien
- 10.11.2023 in Braunschweig
Peter Burschel: Quo vadis Forschungsbibliothek?

FESTVERANSTALTUNG

mit Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille am 21. April 2023

Carl Friedrich Gauß-Kolloquium „modular forms and sphere packings“

Klaus Hulek, Leibniz Universität Hannover, Institut für Algebraische Geometrie, Mitglied der BWG

Einführung in die Thematik und Moderation

Don Zagier, Max-Planck-Institut für Mathematik, Bonn und ICTP Trieste
The algebraicity conjecture for special values of Green's functions

Henry Cohn, MIT, Department of Mathematics und Microsoft Research
New England

Sphere packing, Fourier interpolation, and ground states in 8 and 24 dimensions

Gabriele Nebe, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Algebra und Zahlentheorie
Extremal lattices

Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille

Reinhold Haux, Präsident der BWG

Begrüßung 145

Anja Hesse, Kulturdezernentin der Stadt Braunschweig

Grußworte der Stadt Braunschweig 149

Joachim Escher, Präsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung,
Mitglied der BWG

Grußworte 153

Falko Mohrs, Minister für Wissenschaft und Kultur

Grußworte 155

Bericht 159

Jürg Kramer, Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Mathematik

Laudatio zur Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille 2023 an
Professorin Dr. Maryna Viazovska, École Polytechnique Fédérale de
Lausanne, Chaire d'arithmétique 167

Maryna Viazovska, Schweiz

Festvortrag: Packing spheres in big dimensions

Urkunde der Preisträgerin 179

SYMPOSIEN UND KOLLOQUIEN

15.02.2023 2. SYnENZ-Symposium
und Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz:

16.02.2023 Über das erweiterte Zusammenwirken lebender und nicht
lebender Entitäten im Zeitalter der Digitalisierung:

Beurteilen – Messen – Bewerten

Haus der Wissenschaft, Pockelsstraße 11,
Raum Veolia/Weitblick, Braunschweig

Programm 181

Reinhold Haux, Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover, Präsident der BWG und Mitglied der SYnENZ-Kommission

Begrüßung

Manfred Krafczyk, Vizepräsident der TU Braunschweig, Mitglied der BWG

Begrüßung

Jochen Steil, Institut für Robotik und Prozessinformatik der TU Braunschweig, Mitglied der BWG und Sprecher der SYnENZ-Kommission

Begrüßung

Beurteilen *Stefan Heuser*, Institut für Ev. Theologie und Religionspädagogik der TU Braunschweig. Mitglied der SYnENZ-Kommission der BWG
Einführung

Bruno Gransche, Department Philosophie, Institut für Technikzukünfte ITZ des Karlsruhe Institut für Technologie, und

Arne Manzeschke, Anthropologie und Ethik, Evangelische Hochschule Nürnberg

Synergie der Intelligenzen? – Was wir beurteilen sollten, bevor wir messen und bewerten

Susanne Beck, Kriminalwissenschaftliches Institut der Leibniz Universität Hannover, Mitglied der BWG und der SYnENZ-Kommission

Meaningful Human Control

Messen *Reinhold Haux*, Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover, Präsident der BWG und Mitglied der SYnENZ-Kommission
Einführung

Dominik Wolff, Nachwuchsgruppenleiter am Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover, und

Michael Marscholke, Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover, Mitglied der BWG und der SYnENZ-Kommission

Closing the Circle in a Learning Health System

Meike Jipp, Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig, Mitglied der BWG und der SYnENZ-Kommission
 Mobilitätsverhalten und Verkehrssysteme: Gestaltung klimafreundlicher Interaktion

Öffentliche Abendveranstaltung

Johannes Weyer, Seniorprofessor für Nachhaltige Mobilität an der TU Dortmund
 Vermenschlichung von Technik? Soziologische Blicke auf das Zusammenspiel von Mensch und autonomer Technik

Jochen Steil, Institut für Robotik und Prozessinformatik der TU Braunschweig, Mitglied der BWG und Sprecher der SYnENZ-Kommission
 Ist Künstliche Intelligenz zu kontrollieren?

Bewerten *Tim Kacprowski*, Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover, Mitglied der SYnENZ-Kommission
 Einführung

Barbara Buchberger, MPH, Robert Koch Institut, Berlin
 Die Perspektive der evidenzbasierten Public Health

Sabine Salloch, Institut für Ethik, Geschichte und Philosophie der Medizin der Medizinischen Hochschule Hannover, Mitglied der SYnENZ-Kommission der BWG
 Mein Doktor, die KI und ich: Ethische Aspekte des Einsatzes Künstlicher Intelligenz in der Gesundheitsversorgung

Keynote *Klaus Bengler*, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München
 Intelligent Machines – Intelligent Humans Who Changes Whom?

21.06.2023 **19. Bioethik-Symposium „Umwelt und Gesundheit“**

Haus der Wissenschaft, Pockelsstraße 11,
 Raum Veolia/Weitblick, Braunschweig,
 14.00 bis 18.00 Uhr

Programm 185

Reinhold Haux, Präsident der BWG
 Begrüßung 189

Christel Müller-Goymann, BWG
 Einführung 193

Tomke Zschachlitz, Umweltbundesamt Berlin
Umweltmedizin im 20. und 21. Jahrhundert

Ali Müfit Bahadır, ehem. Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie der TU Braunschweig, Mitglied der BWG
Wasser – ein knappes Gut weltweit

195

Stephan Weber, Institut für Geoökologie, Klimatologie und Umweltmeteorologie der TU Braunschweig
Fein, feiner, ultrafein – Partikuläre Luftbelastung in Städten

Klaus Gahl, Mitglied der BWG
Schlusswort

30.11.2023 **80 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft**

Kolloquium

Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte

Fallersleber-Tor-Wall 16
38100 Braunschweig
9.30 bis 12.00 Uhr

Programm

221

Begrüßung: Reinhold Haux
Präsident der BWG

Vortrag: Ulrich Menzel
TU Braunschweig, Department Sozialwissenschaften
Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte

Kommentar zum Vortrag: Brage bei der Wieden
Niedersächsisches Landesarchiv, Leiter der Abteilung
Wolfenbüttel

Kommentar zum Vortrag: Christian Kehrt
TU Braunschweig, Institut für Wissenschafts- und Technikgeschichte

Kommentar zum Vortrag: Henning Steinführer
Stadt Braunschweig, Leiter des Stadtarchivs

Kommentar zum Vortrag: Bettina Wahrig
TU Braunschweig, Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften mit Schwerpunkt Pharmaziegeschichte

Diskussion, Moderation: Harald Budelmann
Vizepräsident der BWG

Festveranstaltung
Aufgaben von Universitäten und Gelehrtenesellschaften
Aktuelle Standortbestimmung. Chancen,
Herausforderungen, Erwartungen

Aula der TU Braunschweig
 Pockelsstraße 11
 38106 Braunschweig
 14.00 bis 16.00 Uhr

Programm

223

Eröffnung: Reinhold Haux
 Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen
 Gesellschaft

Begrüßung und Moderation: Janina Bahnemann
 Universität Augsburg, Institut für Physik, Sprecherin der
 Jungen BWG 2019–2022

Perspektive Politik: Joachim Schachtner
 Staatssekretär im Niedersächsischen Ministerium für
 Wissenschaft und Kultur
 80 Jahre und das Wichtigste kommt noch? Die Rolle der
 Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in der
 Zukunft

Perspektive Universität: Volker Epping
 Präsident der Leibniz Universität Hannover
 Das Verhältnis von Universitäten und Akademien aus der
 historischen Perspektive

Angela Ittel
 Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig
 Synergien zwischen wissenschaftlichen Gesellschaften und
 Universitäten vor dem Hintergrund gesellschaftlicher
 Herausforderungen

Sylvia Schattauer
 Präsidentin der Technischen Universität Clausthal
 Gesamtgesellschaftliche Aufgaben für die Transformation der
 energieintensiven Industrien – Sicherstellung Energie/Rohstoffe/
 Fachkräfte

Perspektive Gelehrtenesellschaften: Daniel Göske
 Präsident der Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften
 zu Göttingen
 Learned Societies: Wie, wem und wozu Gelehrtenesellschaften
 dienen

Reinhold Haux
 Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen
 Gesellschaft
 Technik im Wandel – Gesellschaften/Lebenswirklichkeiten im
 Wandel: Beiträge von Gelehrtenesellschaften?
 Schlussworte: Thomas Hanschke
 Präsident der Technischen Universität Clausthal 2009–2018

RECOLLECT

02.06.2023 in Braunschweig

21.07.2023 in Braunschweig

Nicole C. Karafyllis, Institut für Philosophie der TU Braunschweig
 BWG-Querschnittsbereich zur Sammlungsforschung 225

JUNGE BWG

03.02.2023 13.00 Uhr Mitgliederversammlung

14.04.2023 11.30 Uhr Mitgliederversammlung

14.07.2023 10.00 Uhr Mitgliederversammlung

01.09.2023 16.00 Uhr Sommerfest

24.11.2023 10.00 Uhr Mitgliederversammlung

Felix Kaspar, Stefanie Kroker, Friederike Hendriks und Ulrich Römer,
 Bericht zu den Aktivitäten in 2023 229

Tim Fingscheidt, Zhengyang Li, Timo Lohrenz, Institut für Nachrichtentechnik,
 TU Braunschweig
 From End-to-End Automatic Speech Recognition to ChatGPT:
 A Technical Journey 233

Esther Greussing, Institut für Kommunikationswissenschaft, TU Braunschweig
 Wissenschaftskommunikation im Zeitalter künstlicher Intelligenz 245

ÖFFENTLICHE VORTRÄGE UND VERANSTALTUNGEN

Akademie-Vorlesungen „Mobilität in der Zukunft: bedarfsgerecht, sicher und nachhaltig“

Gemeinsame Veranstaltung der Braunschweigischen
 Wissenschaftlichen Gesellschaft und dem Kulturinstitut der
 Stadt Braunschweig

Programm und Zusammenfassung 255

07.06.2023 *Thomas Siefer*, Technische Universität Braunschweig,
 Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb,
 Mitglied der BWG Die Zukunft der Eisenbahn –
 Integraler Bestandteil nachhaltiger Mobilität 259

- 28.06.2023 *Klaus Dilger*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik. Mitglied der BWG
Fahrzeugleichtbau im Umfeld von Circular Economy und E-Mobility
- 16.08.2023 *Arno Kwade*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Bioverfahrenstechnik. Mitglied der BWG
Nachhaltige Produktion von Batteriezellen und Zukunftstrends
- 13.09.2023 Ausgefallen:
Rolf Radespiel, Technische Universität Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik. Mitglied der BWG
Luftverkehr der Zukunft: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit
- 11.10.2023 Ausgefallen:
Monika Sester, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Kartographie und Geoinformatik
Erfassung und Prädiktion des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern
- 15.11.2023 *Meike Jipp*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung. Mitglied der BWG,
und
Karsten Lemmer, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Vorstand Innovation, Transfer und wissenschaftliche Infrastrukturen. Mitglied der BWG
Verkehrssysteme gestalten: Energieträger, Angebote und Verkehrsmittel
- 12.12.2023 *Vanessa Carlow*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Sustainable Urbanism

Schöne Straßen, nachhaltige Städte: Die Rückgewinnung der Straße als Raum für alle
- 15.11., 22.11., **Vortragsreihe im phäno Wolfsburg „Energiewende“**
29.11. und Science Center phäno, phäno Wissenschaftstheater,
07.12.2023 Willy-Brandt-Platz 1, 38440Wolfsburg

Gemeinsame Veranstaltung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen und dem phäno, Wolfsburg

Programm 271
- 15.11.2023 *Gerhard Wörner*, Professor für Geochemie an der Universität Göttingen, Mitglied der NAWG Kritische Rohstoffe der Energiewende: wieviel, woher und reicht das? 275

22.11.2023	Nachholtermin: 25.01.2024 <i>Raimund Rolfes</i> , Mitglied der BWG (*, ^a , ^b) und <i>Andreas Ehrmann</i> (*, ^b), *Leibniz Universität Hannover, ^a Institut für Statik und Dynamik, ^b ForWind – Zentrum für Windenergieforschung Offshore Megastrukturen: Zukünftige Energieversorgung durch Windenergieanlagen neuer Dimension	291
29.11.2023	<i>Katharina Kohse-Höinghaus</i> , Seniorprofessorin für Physikalische Chemie an der Universität Bielefeld, Mitglied der NAWG Verbrennung im Kontext von Klima und Energiewende	297
07.12.2023	<i>Ernst Gockenbach</i> , Institut für Elektrische Energiesysteme, Leibniz Universität Hannover, Mitglied der BWG Energiewende aus der Sicht der elektrischen Energieversorgung	299

SOMMERFEST

in den Räumen der BWG am 30.06.2023

<i>Bernhard Vowinkel</i> : Numerische Simulationen von Sedimenttransport in Offenen Gewässern	307
--	-----

PREISVERLEIHUNGEN

Verleihung des Braunschweiger Bürgerpreises für herausragende studentische Leistungen am 6. Dezember 2023

Programm	321
----------	-----

MITTEILUNGEN

Veröffentlichungen und Geschäftliche Mitteilungen	323
---	-----

PERSONALIA

Todesfälle	324
Nachrufe	325
Zuwahlen 2023	340
Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949–2023	341

Vorwort

Im Jahr 2023 konnten die BWG und die Junge BWG wieder zu ihren üblichen Veranstaltungen in Präsenz zurückkehren, was von allen Mitgliedern sehr begrüßt wurde, da für einen wissenschaftlichen Austausch unter den BWG-Mitgliedern eine persönliche Anwesenheit bei den Veranstaltungen notwendig ist. Durch die vorhandenen technischen Einrichtungen in der Geschäftsstelle der BWG wird auch zukünftig eine Online-Teilnahme an den BWG-internen Veranstaltungen möglich sein.

Leider wurde in 2023 der Krieg in der Ukraine durch den Angreifer Russland unvermindert weitergeführt und hat das Leben vieler Menschen in der Ukraine zerstört und notwendige Lebensgrundlagen vernichtet. Die BWG hatte sich bereits in 2022 der gemeinsamen Stellungnahme der Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften angeschlossen und den kriegesrischen Angriff auf die Ukraine zutiefst verurteilt, da Wissenschaft für eine internationale Kooperation und internationalen Austausch steht, wozu Frieden und Freiheit unabdingbare Voraussetzungen sind.

Zum 1. Januar 2023 hat der neue Präsident der BWG, Herr Prof. Dr. Reinhold Haux, sein Amt angetreten und seine Überlegungen für die kommende Amtszeit mit den Worten „Erhalten und erneuern, immer im Sinne der Ziele der BWG“ ausgeführt und dazu den Aphorismus zitiert „Tradition ist nicht das Halten der Asche, sondern das Weitergeben der Flamme“. Zum Neujahrsempfang der BWG am 28. Januar 2023 hielt Frau Prof. Dr. Susanne Beck einen Vortrag mit dem Titel „Maschinen außer Kontrolle? – Wie wir KI durch Interdisziplinarität in unser Leben integrieren können“.

Am 21. April fand die Festveranstaltung mit Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille statt. Das Kolloquium unter dem Titel „Modular forms and sphere packings“ beinhaltete unter der Moderation von Herrn Prof. Dr. Klaus Hulek Vorträge von

- Prof. Dr. Don Zagier, Max Planck Institut für Mathematik, Bonn, mit dem Thema „The algebraicity conjecture for special values of Green’s functions,
- Prof. Dr. Henry Cohn, MIT, Department of Mathematics and Microsoft Research, New England, mit dem Thema „Sphere packing, Fourier interpolation, and ground states in 8 and 24 dimensions“,
- Frau Prof. Dr. Gabriele Nebe, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Algebra und Zahlentheorie, mit dem Thema „Extremal lattices“.

Die Carl Friedrich Gauß-Medaille wurde dann nach Grußworten von Prof. Dr. Anja Hesse, Dezernentin für Kultur und Wissenschaft der Stadt Braunschweig, Falko Mohrs, niedersächsischer Minister für Wissenschaft und Kultur, und Prof. Dr. Joachim Escher, Präsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, durch den Präsidenten der BWG in einer festlichen Veranstaltung an Frau Prof. Dr. Maryna Viazovska, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Chaire d'arithmétique, verliehen in Würdigung ihrer Leistungen und Verdienste in der Mathematik, insbesondere in der Theorie dichtester Kugelpackungen. Frau Prof. Dr. Maryna Viazovska erhielt 2022 die Fields-Medaille, die auch als „Nobelpreis der Mathematik“ bezeichnet wird.

Die BWG-Kommission Synergie und Intelligenz (SYnENZ) befasste sich mit den technischen, ethischen und rechtlichen Herausforderungen des Zusammenwirkens lebender und nicht lebender Entitäten. Das Thema des diesjährigen Symposiums war „Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz: Beurteilen-Messen-Bewerten“.

Im Jahr 2023 standen für den Querschnittsbereich RECOLLECT forschersich die Reflexion der Restitutionsdebatte um die von Deutschland an Nigeria zurückgegebenen Benin-Bronzen sowie die Weiterführung der Konzept-Arbeit um das Verhältnis von Migration und Sammlungsobjekt im Vordergrund. Hauptaufgabe des Querschnittsbereichs RECOLLECT ist die transdisziplinäre Verständigung über Methoden, Objekte und Begriffe der Sammlungsforschung unter Einbindung regionaler Sammlungsinstitutionen und ihrer Bestände. Konzeptuell analysiert und weiter entwickelt werden Sammlungen, Sammlungsobjekte und das Sammeln selbst.

Die Junge BWG hat in ihren ordentlichen Sitzungen neben der Vorstellung neuer Mitglieder eine Infoveranstaltung zu ERC-Grants mit Erfahrungsberichten von geförderten Forscherinnen und Forscher durchgeführt. Vorträge in den Sitzungen und beim Sommerfest waren

- Biofilme – Anwendung und Vermeidung von Dr.-Ing. Kathrin Dohnt,
- From End-to-End Automatic Speech Recognition to ChatGPT von Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt,
- Wissenschaftskommunikation im Zeitalter künstlicher Intelligenz von Dr. Esther Greussing.

Im Jahr 2023 wurde eine neue Kommission „Jüdische Geschichte und Kultur zwischen Harz und Heide“ eingerichtet. Hintergrund und Zielsetzung der Kommission sind eine gewissermaßen revisionistische Arbeitshypothese, die darauf hinausläuft, dass die jüdische Modernisierung im Gefolge der Jüdischen Aufklärung (Haskala) zwei Verdichtungsorte hat, das Berlin Moses Mendelssohns und der ihm folgenden Maskilim, und die Region zwischen Harz und Heide mit

Verdichtungsorten in Braunschweig, Seesen, Wolfenbüttel. Dieser Ort ist in der Forschung sowie in der Wahrnehmung der Öffentlichkeit bislang weitgehend unbekannt.

Das 19. Bioethik-Symposium „Umwelt und Gesundheit“ befasste sich mit einem kleinen Ausschnitt eines übergroßen nicht nur nationalen, sondern globalen Problems: mit der Frage, wie die von Menschen mitverursachten Umweltveränderungen die Gesundheit der Menschen, ja der Menschheit beeinträchtigen. Und wie können wir die gefährdete Gesundheit der Menschen schützen? Unter der Leitung von Prof. Dr. Christel Müller-Goymann fanden 3 Vorträge statt:

- Dr. Tomke Zschachlitz, Umweltbundesamt Berlin, „Umweltmedizin im 20. und 21. Jahrhundert“,
- Prof. em. Dr. Ali Müfit Bahadır, ehem. Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie, TU Braunschweig, „Wasser – ein knappes Gut“,
- Prof. Dr. Stephan Weber, Institut für Geoökologie, Klimatologie und Umweltmeteorologie, TU Braunschweig, „Fein, feiner, ultrafein – Partikuläre Luftbelastung in Städten“.

Die gemeinsam mit der Stadt Braunschweig ausgerichteten Akademie-Vorlesungen behandelten in diesem Jahr das Thema „Mobilität in der Zukunft – bedarfsgerecht, sicher und nachhaltig“ mit den Vortragsthemen

- Die Zukunft der Eisenbahn – integraler Bestandteil nachhaltiger Mobilität
- Fahrzeugleichtbau im Umfeld von Circular Economy und E-Mobility
- Nachhaltige Produktion von Batteriezellen und Zukunftstrends
- Luftverkehr der Zukunft: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit
- Erfassung und Prädiktion des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern
- Verkehrssysteme gestalten: Energieträger, Angebote und Verkehrsmittel
- Schöne Straßen, nachhaltige Städte: Die Rückgewinnung der Straße als Raum für alle

Gemeinsam haben die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen vier Referentinnen und Referenten aus unterschiedlichen Fachrichtungen gewinnen können, die zum Thema „Energiewende“ forschen. Die Vortragsthemen waren

- Metallische Rohstoffe
- Windanlagen
- Emissionen
- Elektrische Energieversorgung

Zu den organisatorischen Veränderungen der BWG ist zu erwähnen, dass die mit sehr großer Mehrheit verabschiedete Satzung 2023 in Kraft getreten ist und auf der Internetseite der BWG zur Verfügung steht.

Der Höhepunkt der Veranstaltungen der BWG im Jahr 2023 war am 30. November die Festveranstaltung „80 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft“ mit dem Untertitel „Aufgaben von Universitäten und Gelehrten-gesellschaften – Aktuelle Standortbestimmung: Chancen, Herausforderungen, Erwartungen“. Am Vormittag fand unter der Leitung von Prof. Dr. Ulrich Menzel ein Kolloquium mit dem Titel „Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte“ und seinem Vortrag „Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte“ statt. Ergänzt wurde der Vortrag durch Kommentare von

- Dr. Brage Bei der Wieden, Niedersächsisches Landesarchiv, Leiter der Abteilung Wolfenbüttel,
- Prof. Dr. Christian Kehrt, TU Braunschweig, Institut für Wissenschafts- und Technikgeschichte,
- Dr. Henning Steinführer, Stadt Braunschweig, Leiter des Stadtarchivs,
- Prof. Dr. Bettina Wahrig, TU Braunschweig, Abteilung für Geschichte der Naturwissenschaften mit Schwerpunkt Pharmaziegeschichte.

Am Nachmittag eröffnete der Präsident der BWG, Prof. Dr. Reinhold Haux, die Festveranstaltung mit den folgenden Beiträgen:

Perspektive Politik

Prof. Dr. Joachim Schachtner, Staatssekretär im Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, „80 Jahre und das Wichtigste kommt noch? Die Rolle der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in der Zukunft“.

Perspektive Universitäten

Prof. Dr. Volker Epping, Präsident der Leibniz Universität Hannover, „Das Verhältnis von Universitäten und Akademien aus der historischen Perspektive“.

Prof. Dr. Angela Ittel, Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig, „Synergien zwischen wissenschaftlichen Gesellschaften und Universitäten vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Herausforderungen“.

Dr. Sylvia Schattauer, Präsidentin der Technischen Universität Clausthal, „Gesamtgesellschaftliche Aufgaben für die Transformation der energieintensiven Industrien – Sicherstellung Energie/Rohstoffe/Fachkräfte“.

Perspektive Gelehrtenesellschaften

Prof. Dr. Daniel Göske, Präsident der Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, „Learned Societies: Wie, wem und wozu Gelehrtenesellschaften dienen“.

Prof. Dr. Reinhold Haux, Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, „Technik im Wandel – Gesellschaften/Lebenswirklichkeiten im Wandel: Beiträge von Gelehrtenesellschaften?“.

Die Schlussworte zu dieser Festveranstaltung sprach Prof. Dr. Thomas Hanschke, Präsident der Technischen Universität Clausthal, 2009–2018.

Die ausführliche Version der Beiträge zum 80-jährigen Bestehen der BWG am 30. November 2023 wird in einer Festschrift „80 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft – Ihre Rolle als Gelehrtenesellschaft und ihr Selbstverständnis“ erscheinen.



Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach
Vizepräsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Organe der BWG seit Gründung

Konstituierende

Sitzung: 30.11.1943

Eröffnungs-

Sitzung: 09.12.1943 [siehe Abhandlungen der BWG 21 (1969), 8]

Erste Sitzung: 1944 [siehe Abhandlungen der BWG 1 (1949), 169]

Zweite Sitzung: 1953 [siehe Abhandlungen der BWG 5 (1953), 212]

Dritte Sitzung: 1971 [siehe Abhandlungen der BWG 22 (1970), 291]

Vierte Sitzung: 1993 [siehe Jahrbuch der BWG (2007),..... 10 ff.]

Fünfte Sitzung: 2008 [siehe Jahrbuch der BWG (2008),..... 10 ff.]

Sechste Sitzung: 2010 [siehe Jahrbuch der BWG (2010),..... 11 ff.]

Siebte Sitzung: 2017 [siehe Jahrbuch der BWG (2017),..... 13 ff.]

Achte Sitzung: 2023 [siehe Jahrbuch der BWG (2023),..... 25 ff.]
und www.bwg.nds./ueber-die-bwg/satzung-und-geschäftsordnungen

Präsidenten

1943–45: Fritz Gerstenberg †; 1946–48: Gustav Gassner †; 1949–50: Hans Herloff Inhoffen †; 1951–53: Eduard Justi †; 1954–56: Leo Pungs †; 1957–59: Max Kohler †; 1960–62: Hans Kroepelin †; 1963–66: Paul Koeßler †; 1967–70: Hermann Blenk †; 1971–77: Karl Gerke †; 1978–80: Herbert Wilhelm †; 1981–86: Karl Heinrich Olsen †; 1987–92: Gerhard Oberbeck †; 1993–95: Werner Leonhard †; 1996–1999: Norbert Kamp †; 2000–2013: Joachim Klein; 2014–2016: Dietmar Brandes; 2017–2019: Otto Richter, 01/2020 bis 06/2020 Ulrich Reimers, 06/2020 bis 12/2020 Klaus Gahl † (kommissarisch), 2021–2022 Otto Richter, seit 01.01.2023 Reinhold Haux

Generalsekretäre

1943–45: Ernst August Roloff †; 1946–48: Wilhelm Gehlhoff †; 1949–50: Eduard Justi †; 1951–53: Hermann Schlichting †; 1954–1959: Hans Herloff Inhoffen †; 1960–61: Hellmut Bodemüller †; 1962–64: Hans Joachim Bogen †; 1965–69: Hermann Schaefer †; 1970–71: Karl Gerke †; 1972–73: Arnold Beuermann †; 1974–80: Karl Heinrich Olsen †; 1981–82: Ulrich Wannagat †; 1983–85: Hans Joachim Kanold †; 1986–88: Egon Richter †; 1989–91: Harmen Thies; 1992–94: Ulrich Wannagat †; 1995–97: Helmut Braß †; 1998–2000: Elmar Steck †; 2001–2010: Claus-Artur Scheier

Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten

2011–2012: Claus-Artur Scheier; seit 2011–2021: Klaus Gahl †; 2013: Dietmar Brandes, 2014–2020 Christel Charlotte Müller-Goymann, seit 01.01.2021 Harald Budelmann und Ernst Gockenbach

Vorsitzende der Klassen

BIS 1954 SEKRETÄRE DER ABTEILUNGEN

Mathematik und Naturwissenschaften

1943–47: G. Cario †; 1948–50: P. Dorn †; 1951–53: H. H. Inhoffen †; 1954–57: P. Dorn †; 1958–60: H. Kroepelin †; 1961: H. Poser †; 1962–64: H. Hartmann †; 1965–66: H. Schumann †; 1967–72: M. Grützmaker †; 1973–76: U. Wannagat †; 1977–80: H. R. Müller †; 1981–84: E. Richter †; 1985–89: O. Rosenbach †; 1990–91: St. Schottlaender †; 1992–94: H.-J. Kowalsky; 1995–97: H. Tietz †; 1998–1999: K. Schügerl †; 2000: G. Müller; 2001–2003: J. Heidberg †; 2004–2006: E. Winterfeldt †; 2007–2012: Th. Hartmann †; 2013–2015: H.-D. Ehrich; 2016: O. Richter; 2017–2021: D. Kaufmann; seit 01.01.2022 M. Tamm

Ingenieurwissenschaften

1943–48: E. Marx †; 1949–53: L. Pungs †; 1954–56: O. Flachsbar †; 1957–60: W. Hofmann †; 1961–64: H. Hausen †; 1965–70: G. Wassermann †; 1971–77: H.W. Henniecke †; 1978–79: Th. Rummel †; 1980–83: M. Mitschke †; 1984–93: R. Jeschar †; 1994–96: H.-G. Unger †; 1997–2000: E. Stein †; 2001–2005: M. Lindmayer; 2006–2008: P. Wriggers; 2009–2011: U. Peil; 2012–2017: J. Müller; 2018–2020: D. Dinkler; 2021–2023 C. Heipke

Bauwissenschaften

1943–44: E. Herzig; 1944–48: J. Petersen; 1949–53: Th. Kristen †; 1954–62: F. Zimmermann †; 1963–67: A. Pflüger †; 1968–69: J. Göderitz †; 1970–73: W. Wortmann †; 1974: K. H. Olsen †; 1975–78: H. Duddeck †; 1979–83: W. Höpcke †; 1984–93: J. Herrenberger †; seit 1994 vereinigt mit der Klasse für Ingenieurwissenschaften

Geisteswissenschaften

1943–48: W. Jesse †; 1949–53: W. Gehlhoff †; 1954–56: W. Jesse †; 1958–61: H. Glockner †; 1962–68: H. Heffter †; 1969–78: A. Beuermann †; 1979–87: M. Gosebruch †; 1988–89: H. Boeder †; 1990–91: G. Maurach; 1992–1998: C.-A. Scheier; 1999: G. Maurach; 2000: C.-A. Scheier; 2001–2010: H.-J. Behr †; 2011–2019: K. Alpers; 2020–2021 N. C. Karafyllis; seit 01.01.2022 P. Burschel

Neufassung der Satzung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft



(in Kraft seit 15.02.2023)

Präambel

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (BWG) ist eine Vereinigung von Gelehrten. Sie hat zum Ziel, sich forschend, fördernd und vermittelnd mit den gesamtgesellschaftlichen Leistungen von Wissenschaft und Technik in einem steten interdisziplinären Diskurs auseinanderzusetzen.

So trägt sie zur Bildung einer wissensorientierten Gesellschaft bei.

Dabei sind die Technikwissenschaften sowohl mit den Naturwissenschaften und der Mathematik als auch mit den Geistes- und Sozialwissenschaften transdisziplinär verbunden. Das integrative Zusammenwirken ermöglicht die Transformation von akademischem zu beratungsorientiertem Wissen.

Die Arbeit der BWG ist zielorientiert und wertebasiert. Ihre Mitglieder pflegen den fächerübergreifenden Dialog. Leitmaximen sind Toleranz, Geschlechtergerechtigkeit und Förderung einer umweltschonenden Wirtschaft und Gesellschaft. Die BWG erkennt in ihrem wissenschaftlichen Handeln die Leitlinien der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis als für sich verbindlich an.

1 Abschnitt I: Grundlagen (§§ 1–6)

§ 1 Ziele und Aufgaben

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft dient der Förderung der Wissenschaften und ihrer Zusammenarbeit. Sie kooperiert mit anderen Wissenschafts- und Bildungsinstitutionen und unterstützt die öffentliche Teilhabe an Forschung und Entwicklung. Mit der Expertise ihrer Mitglieder steht sie Politik und Medien als Ansprechpartnerin zur Verfügung. Sie fördert junge Wissenschaftlerinnen und junge Wissenschaftler. Sie verleiht Auszeichnungen für erfolgreiche wissenschaftliche Leistungen.

§ 2 Rechtsform; Sitz

- (1) Die BWG ist Körperschaft des öffentlichen Rechts in der Trägerschaft des Landes Niedersachsen.
- (2) Sie hat ihren Sitz in Braunschweig.
- (3) Die BWG führt ein Dienstsiegel.

§ 3 Gliederungen der BWG

Die Gesellschaft hat drei Klassen:

- Klasse für Geisteswissenschaften,
- Klasse für Ingenieurwissenschaften,
- Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften.

§ 4 Mitglieder; Rechte und Pflichten

- (1) Die Gesellschaft besteht aus *ordentlichen, korrespondierenden* sowie *außerordentlichen* Mitgliedern und *Ehrenmitgliedern*.
- (2) Zu ordentlichen Mitgliedern können verdienstvolle Gelehrte gewählt werden, die ihren Wohnsitz in Niedersachsen haben. Die Höchstzahl der ordentlichen Mitglieder, welche das 70. Lebensjahr noch nicht vollendet haben, beträgt:
 - 30 für die Klasse für Geisteswissenschaften,
 - 40 für die Klasse für Ingenieurwissenschaften,
 - 30 für die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften.

- (3) Zu korrespondierenden Mitgliedern können ohne Rücksicht auf ihren Wohnsitz verdienstvolle Gelehrte gewählt werden, denen eine regelmäßige persönliche Teilnahme an den Sitzungen und Arbeiten der Gesellschaft nicht möglich ist. Sie können an allen Sitzungen teilnehmen, haben aber kein Stimmrecht. Die Zahl der korrespondierenden Mitglieder ist nicht beschränkt.
- (4) Zu außerordentlichen Mitgliedern können Persönlichkeiten gewählt werden, die durch ihre Expertise oder ihre Funktion in der Organisation und der Förderung der Wissenschaft die Arbeit der BWG durch eine engere organisatorische Einbindung stärken können. Die außerordentlichen Mitglieder können an allen Sitzungen teilnehmen, haben aber kein Stimmrecht.
- (5) Zu Ehrenmitgliedern können Persönlichkeiten ernannt werden, die sich durch hervorragende Verdienste um die BWG oder um die Erreichung der Ziele der BWG ausgezeichnet haben. Ehrenmitglieder können an allen Sitzungen teilnehmen, haben aber kein Stimmrecht.
- (6) Ordentliche Mitglieder, die ihren Verpflichtungen nicht nachzukommen vermögen, können die Überführung in den Status eines korrespondierenden Mitglieds beantragen. Auf Vorschlag ihrer Klasse kann durch den Vorstand die Mitgliedschaft in die eines korrespondierenden Mitglieds umgewandelt werden.

§ 5 Aufnahme und Ausscheiden von Mitgliedern

- (1) Die Mitglieder werden auf Vorschlag von mindestens drei ordentlichen Mitgliedern und auf Antrag der zuständigen Klasse durch die Plenarversammlung in geheimer Abstimmung gewählt.
- (2) Die Mitgliedschaft endet durch Tod, Verzicht oder Ausschluss.
- (3) Auf die Mitgliedschaft kann durch schriftliche Erklärung gegenüber der Präsidentin/dem Präsidenten verzichtet werden. Eine Begründung ist nicht erforderlich.
- (4) Ein Mitglied kann wegen ehrenrührigen Verhaltens oder bei grober Verletzung der Ziele oder der Aufgaben der BWG ausgeschlossen werden.
- (5) Das Verfahren regelt die Geschäftsordnung über die Zuwahlen.

§ 6 Junge BWG

- (1) Die Junge BWG (JBWG) bringt Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler aus Niedersachsen zusammen, um sie in einem besonderen Netzwerk wissenschaftlich zu fördern und in ihrem beruflichen Werdegang zu unterstützen.
- (2) Die JBWG hat den Status einer auf die Klassen bezogenen Arbeitsgemeinschaft der BWG. Sie verwaltet sich im Rahmen der Satzung der BWG und ihrer Geschäftsordnung selbst.

- (3) Die Mitglieder der JBWG nehmen an den wissenschaftlichen Aktivitäten der BWG teil.
- (4) Näheres regelt die von der Plenarversammlung der BWG beschlossene Geschäftsordnung der JBWG.

2 Abschnitt II: Organisation (§§ 7–16)

§ 7 Organe der BWG

Die Organe der BWG sind Plenarversammlung und Vorstand.

§ 8 Plenarversammlung

- (1) Die Plenarversammlung tritt auf Einladung der Präsidentin/des Präsidenten unter Mitteilung einer Tagesordnung zu *ordentlichen* Sitzungen, *Hauptsitzungen* und *außerordentlichen* Sitzungen zusammen. Im Falle ihrer/seiner Verhinderung obliegt die Einladung der dienstältesten Vizepräsidentin/dem dienstältesten Vizepräsidenten. Dies gilt auch für die Leitung der Sitzung.
- (2) Die Plenarversammlung entscheidet über die Verleihung von Preisen der BWG, insbesondere der Gauß-Medaille. Näheres regeln Bestimmungen zu Preisverleihungen.
- (3) Die ordentlichen Sitzungen dienen dem transdisziplinären wissenschaftlichen Gedankenaustausch. Sie finden in der Regel einmal im Monat statt, meist in Verbindung mit wissenschaftlichen Vorträgen. Die Einladungsfrist beträgt drei Wochen. Eingeladen werden alle Mitglieder einschließlich der Mitglieder der JBWG.
- (4) Hauptsitzungen dienen der Beratung und Beschlussfassung zu allen personellen und organisatorischen Angelegenheiten. Dazu gehören Wahlen und Ernennungen, Änderung der Satzung, Verabschiedung von Geschäftsordnungen und sonstigen Regularien, Genehmigung des Haushaltsplans, die Entlastung des Vorstands sowie Grundsatzfragen. Hauptsitzungen werden in der Regel zweimal im Jahr abgehalten. Die Einladungsfrist beträgt drei Wochen. Zu den Hauptsitzungen werden nur die ordentlichen Mitglieder eingeladen.
- (5) Außerordentliche Sitzungen können mit einer Frist von einer Woche einberufen werden, wenn gewichtige, unvorhergesehene Umstände ein schnelles Handeln der Plenarversammlung zweckmäßig erscheinen lassen. Sie sind einzuberufen, wenn 10 Prozent der ordentlichen Mitglieder, unabhängig von ihrer Klassenzugehörigkeit, die Einberufung förmlich beim Vorstand beantragen. Eingeladen werden nur die ordentlichen Mitglieder.
- (6) Plenarversammlungen sind beschlussfähig, wenn mindestens 20 Prozent der ordentlichen Mitglieder an der Sitzung teilnehmen.

- (7) Die Tagesordnung wird vom Vorstand aufgestellt. Über sie ist zu Beginn der Sitzung abzustimmen. Auch die Beschlussfähigkeit der Plenarversammlung ist zu Beginn der Sitzung festzustellen.
- (8) Das Nähere regelt eine Geschäftsordnung.

§ 9 Der Vorstand

- (1) Die Präsidentin/Der Präsident, die Vizepräsidentinnen und Vizepräsidenten sowie die Klassenvorsitzenden bilden den Vorstand. Er hat als Hauptaufgabe, den Haushaltsplan unter Einschluss des Stellenplans aufzustellen sowie über Inventar und Vermögen der Gesellschaft im Rahmen der Beschlüsse der Plenarversammlung zu verfügen und über Arbeitsvorhaben und Arbeitsweise der Gesellschaft zu beschließen. Darauf bezogene Aktionen sind vorab im Vorstand zu beraten.
- (2) Den Vorsitz im Vorstand hat die Präsidentin/der Präsident, im Fall ihrer/seiner Verhinderung die dienstälteste Vizepräsidentin/der dienstälteste Vizepräsident.
- (3) Der Vorstand ist im Übrigen befugt, über alle Angelegenheiten der Gesellschaft Beschlüsse zu fassen, sofern die Entscheidung nicht in die Zuständigkeit der Plenarversammlung, der Präsidentin/des Präsidenten, der Vizepräsident(inn)en oder der Klassenvorsitzenden fällt.
- (4) Die Präsidentin/Der Präsident kann zur Beratung des Vorstands weitere Mitglieder der Gesellschaft und andere Persönlichkeiten hinzuziehen, deren Teilnahme im Interesse der Gesellschaft liegt.
- (5) Eine außerordentliche Sitzung des Vorstands ist auf Verlangen einer Klasse einzuberufen.
- (6) Näheres regelt die Geschäftsordnung des Vorstands.

§ 10 Präsidentin/Präsident und Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten

- (1) Die Leitung der Gesellschaft obliegt der Präsidentin/dem Präsidenten. Sie/Er führt in allen Ausschüssen, soweit nicht andere Regelungen getroffen sind, den Vorsitz, gibt bei allen mündlichen Abstimmungen im Falle der Stimmgleichheit mit ihrer/seiner Stimme den Ausschlag, unterzeichnet zusammen mit der Protokollführerin/dem Protokollführer die Sitzungsprotokolle und sorgt für die Ausführung der von der Plenarversammlung, dem Vorstand und weiteren Ausschüssen gefassten Beschlüsse.
- (2) Die Präsidentin/Der Präsident hat das Hausrecht am Sitz der Gesellschaft. Sie/Er vertritt die Gesellschaft nach außen und schließt Verträge im Namen der Gesellschaft ab. Dabei hat sie/er die satzungsmäßigen Kompetenzen und Befugnisse des Vorstands und die Beschlüsse zu beachten und einzuhalten, die der Vorstand kraft seiner Zuständigkeit getroffen hat.

- (3) Sie/Er hat die Aufsicht über die Geschäftsführung im Benehmen mit den Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten.
- (4) Die Präsidentin/Der Präsident wird aus dem Kreis der ordentlichen Mitglieder von der Plenarversammlung in geheimer Abstimmung für die Amtsdauer von drei Jahren gewählt. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.
- (5) Die Gesellschaft hat zwei Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten. Die Stellvertretung der Präsidentin/des Präsidenten obliegt der dienstältesten Vizepräsidentin/dem dienstältesten Vizepräsidenten.
- (6) Die Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten vertreten sich gegenseitig. Eine/Einer der beiden Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten ist für die Veranstaltung öffentlicher Vorträge zuständig, die/der andere für die Plenarvorträge und die Herausgabe der Veröffentlichungen der Gesellschaft. Die beiden Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten entscheiden gemeinsam darüber, wer von ihnen welche Aufgabe übernimmt.
- (7) Für die Wahl der Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten gilt Abs. 4 entsprechend.
- (8) Die Wahl der Präsidentin/des Präsidenten und der Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten erfolgt so, dass in jedem Jahr eine der jeweiligen Amtszeiten endet.

§ 11 Beendigung des Amtes des Präsidenten/der Präsidentin und der Vizepräsident(inn)en

- (1) Die Ämter der Präsidentin/des Präsidenten und der Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten erlöschen durch Tod, Rücktritt oder Amtsunfähigkeit wegen einer Krankheit.
- (2) Der Rücktritt ist unbedingt und ohne Vorbehalt gegenüber den Mitgliedern zu erklären.
- (3) Amtsunfähigkeit wegen Krankheit liegt dann vor, wenn die Präsidentin/der Präsident oder eine Vizepräsidentin/ein Vizepräsident mindestens vier Monate die Amtsgeschäfte nicht wahrgenommen hat. Die förmliche Feststellung der Amtsunfähigkeit trifft der Vorstand.

§ 12 Klassenvorsitzende und Transdisziplinaritätsbeauftragte

- (1) Die Leitung der Klasse obliegt der/dem Klassenvorsitzenden; § 10 Abs. 1 Satz 2 gilt entsprechend.
- (2) Die ordentlichen Mitglieder jeder Klasse wählen aus ihrem Kreis in geheimer Abstimmung die/den Klassenvorsitzende/Klassenvorsitzenden für die Amtszeit von drei Jahren in der Weise, dass jedes Jahr eine/einer der Klassenvorsitzenden ausscheidet. Wiederwahl ist zulässig. Ersatzwahlen erfolgen für den Rest der Amtsdauer.

(3) Zur Stärkung der transdisziplinären Verbundenheit zwischen den Klassen wird in jeder Klasse auf Vorschlag der/des Klassenvorsitzenden in offener Stimmabgabe für die Dauer von drei Jahren eine/ein Transdisziplinäritätsbeauftragte/Transdisziplinäritätsbeauftragter gewählt.

(4) Im Falle ihrer/seiner Verhinderung wird die/der Klassenvorsitzende durch die/den Transdisziplinäritätsbeauftragte(n) vertreten.

§ 13 Geschäftsstelle der BWG

(1) Die Geschäftsstelle der BWG befindet sich am Sitz der BWG. Sie erfüllt die üblichen Aufgaben eines Sekretariats und die Buchhaltung der BWG. Das schließt die laufende Pflege der Homepage der Gesellschaft ein.

(2) Über die Besetzung der Personalstellen entscheidet die Präsidentin/der Präsident im Einvernehmen mit dem Vorstand.

(3) Weisungsbefugt gegenüber dem Personal sind die Präsidentin/der Präsident, die Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten, die Klassenvorsitzenden und die/der Archivbeauftragte in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsbereich. In Konfliktfällen entscheidet die Präsidentin/der Präsident.

(4) Die Entscheidung über die Archivierung der Akten (Vorgänge) der BWG trifft die/der Archivbeauftragte der Gesellschaft mit Unterstützung der Geschäftsstelle.

§ 14 Allgemeine Verfahrensgrundsätze

(1) Sofern in der Satzung und in den auf ihrer Grundlage beschlossenen Geschäftsordnungen nichts anderes bestimmt ist, gelten diese allgemeinen Verfahrensgrundsätze.

(2) Die Abhaltung von Sitzungen im Online-Verfahren oder hybrid ist zulässig, sofern die gleichberechtigte Teilnahme der Mitglieder in technischer Hinsicht ohne einen für sie unzumutbaren Aufwand gewährleistet ist. Das Nähere regelt § 15.

(3) Sieht die Tagesordnung die Entscheidung über eine Änderung der Satzung oder über einen Vorgang vor, dessen Beurteilung die Kenntnis bestimmter Unterlagen voraussetzt, sind diese der Einladung beizufügen. Tischvorlagen sind nur in Ausnahmefällen zulässig.

(4) Zu allen Sitzungen der Organe und Gremien der BWG und der JBWG hat die/der jeweilige Vorsitzende die Mitglieder unter Angabe einer Tagesordnung, sofern nichts anderes bestimmt ist, mit einer Frist von 3 Wochen einzuladen.

(5) Zu Beginn der Sitzung wird eine Person von dem Leiter/der Leiterin der Sitzung mit der Führung des Protokolls beauftragt. Er/Sie unterzeichnet das Protokoll nach der Fertigstellung zusammen mit dem Leiter/der Leiterin der Sitzung,

der/die das Protokoll an die Teilnehmer/innen versendet. Das Protokoll wird auf der nächstfolgenden Sitzung gemäß der Tagesordnung genehmigt.

(6) Beschlüsse werden, sofern nichts anderes bestimmt ist, mit der Mehrheit der anwesenden stimmberechtigten Mitglieder gefasst.

(7) Ordentliche Mitglieder können ihr Stimmrecht in Schriftform auf ein anderes ordentliches Mitglied übertragen. In diesem Fall gelten sie als anwesend.

(8) Wahlen und Benennungen in Funktionen für Organe, Ausschüsse und Arbeitsgruppen gelten, sofern nichts anderes bestimmt ist, für die Dauer von drei Jahren

§ 15 Durchführung von Sitzungen im Online-Verfahren

(1) Der Vorstand kann beschließen, dass die Teilnahme an Sitzungen auch im Online-Verfahren möglich ist. Es gelten, sofern nichts anderes bestimmt ist, die Fristen und Regelungen gemäß § 14.

(2) Das für die Durchführung von geheimen Abstimmungen gewählte technische Verfahren muss neben anonymer Stimmabgabe auch Nachvollziehbarkeit und Unverfälschtheit sicherstellen. Im Zweifelsfall sind die geheimen Abstimmungen über Briefwahl durchzuführen.

(3) Das Anfertigen von Mitschnitten der Online-Sitzung und deren Verbreitung ist nicht gestattet.

§ 16 Kostenerstattung

(1) Mitglieder, die im förmlichen Auftrage der Gesellschaft satzungsgemäße Aufgaben erfüllen, haben Anspruch darauf, dass ihnen die notwendigen Kosten, die sich daraus für sie ergeben, als Auslagenerstattung (Reisekosten, Kosten für Sachmittel und Gebühren) von der Gesellschaft erstattet werden. Die Erstattung richtet sich nach den Bestimmungen des niedersächsischen Landesrechts.

(2) Die Entscheidung über den einzureichenden Antrag obliegt der Präsidentin/ dem Präsidenten.

3 Abschnitt III: Tätigkeiten der BWG (§§ 17–26)

§ 17 Tätigkeiten im Überblick

(1) Forschungsarbeiten (§ 18)

(2) Kommissionen und Querschnittsbereiche (§ 19)

(3) Wissenstransfer in die Gesellschaft (§ 20)

(4) Veröffentlichungen (§ 21)

- (5) Arbeitsgruppen und Beauftragte (§ 22)
- (6) Verleihung der Gauß-Medaille (§ 23)
- (7) Mitwirkung an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises (§ 24)
- (8) BWG-Archivpflege (§ 25)
- (9) Haushalt und Rechnungsprüfung (§ 26)

§ 18 Forschungsarbeiten

Die Gesellschaft kann eigene Forschungsarbeiten durchführen, Forschungsarbeiten ihrer Mitglieder oder dritter Personen organisatorisch und inhaltlich unterstützen, wissenschaftliche Stellungnahmen und Gutachten abgeben sowie wissenschaftliche Tagungen und Symposien veranstalten. Hauptformate der Forschungstätigkeit der Gesellschaft sind Kommissionen und Querschnittsbereiche.

§ 19 Kommissionen und Querschnittsbereiche

Zur Förderung und Stärkung der transdisziplinären und interdisziplinären Ausrichtung ihrer wissenschaftlichen Arbeit kann die Gesellschaft als organisatorische Instrumente Kommissionen und Querschnittsbereiche einrichten. Das Nähere regelt eine Geschäftsordnung.

§ 20 Wissenstransfer in die Gesellschaft

- (1) Die BWG steht der Öffentlichkeit als Ansprechpartnerin zu Fragen der Wissenschaft und Technik zur Verfügung.
- (2) Zur Unterstützung der Teilhabe der Gesellschaft an Forschung und Entwicklung lädt die BWG zu öffentlichen Veranstaltungen ein. Unter möglichst breiter Nutzung verschiedener Veranstaltungs- und Medienformate (Vorträge, Kolloquien, Symposien, Podiumsdiskussionen) wird über aktuelle, auch kontroverse Forschungsthemen informiert und diskutiert.
- (3) Die Arbeit der Kommissionen und Querschnittsbereiche ist eine wesentliche Basis für die Ansprache der Öffentlichkeit. Sie trägt zur Prägung des Themenspektrums bei.
- (4) Durch Kooperation mit anderen Wissenschafts- und Bildungsinstitutionen wird das wissenschaftliche Kompetenzprofil der BWG ergänzt und vertieft.
- (5) Die BWG kann Stellungnahmen zu aktuellen Entwicklungen in Wissenschaft und Technik veröffentlichen (z. B. in Form von Denkschriften oder Presseerklärungen). Diese müssen, soweit sie nicht im Rahmen von Kommissionen oder Querschnittsbereichen entstanden sind, von jeweils mindestens fünf ordentlichen Mitgliedern verfasst worden sein.
- (6) Über jede Art von Veröffentlichung entscheidet der Vorstand.

§ 21 Veröffentlichungen

- (1) Die Hauptpublikation der BWG ist das „Jahrbuch der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft“. Für die Redaktion verantwortlich zeichnet eine/r der beiden Vizepräsident(inn)en.
- (2) Publikationsorgan der im Geschäftsjahr gehaltenen Vorträge ist das „Jahrbuch“. Zu ihrer Dokumentation genügt in Ausnahmefällen die Kurzfassung.
- (3) Die Gesellschaft kann darüber hinaus wissenschaftliche Schriften und Berichte (Tagungsbände, Dokumentationen, Monographien usw.) herausgeben. Beiträge von Autorinnen und Autoren, die nicht Mitglieder der BWG sind, werden von Mitgliedern vorgeschlagen und bedürfen der Befürwortung der betreffenden Klasse.
- (4) Veröffentlichungen können auch in digitaler Form auf der Homepage der Gesellschaft erfolgen.

§ 22 Arbeitsgruppen und Beauftragte

- (1) Zur Vorbereitung von Entscheidungen zur Lösung klar definierter, mehr oder weniger eng begrenzter aktueller Probleme kann die Gesellschaft „Arbeitsgruppen“ bilden. Ihre Mitglieder werden aufgrund eines Beschlusses des Vorstands auf Vorschlag der Klassenvorsitzenden von der Präsidentin/dem Präsidenten ernannt.
- (2) Der Vorstand kann auf Vorschlag der Klassen für die Erfüllung bestimmter, eng begrenzter Aufgaben „Beauftragte“ ernennen.

§ 23 Verleihung der Gauß-Medaille

Die Gesellschaft verleiht, in der Regel jährlich zum Geburtstag von Carl Friedrich Gauß am 30. April, die „Carl Friedrich Gauß-Medaille“. Zur Entscheidung über die Auswahl der Kandidat(inn)en wird von der Präsidentin/dem Präsidenten die Plenarversammlung einberufen. Das Verfahren regeln gemäß § 8 Abs. 2 der Satzung die Bestimmungen für die Verleihung der Gauß-Medaille.

§ 24 Mitwirkung an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises

Die Gesellschaft wirkt gemeinsam mit der Evangelischen Landeskirche Braunschweig, der TU Braunschweig und der Braunschweigischen Kulturstiftung an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises mit. Das Verfahren der Mitwirkung regeln die gemäß § 8 Abs. 2 erlassenen Bestimmungen.

§ 25 BWG-Archivpflege

(1) Die BWG sichert ihr Schriftgut und andere Unterlagen, die von bleibendem Wert für die Erfüllung öffentlicher Aufgaben, für die Sicherung berechtigter privater Interessen oder für die Forschung sind. Zuständig für die Organisation der langfristigen Schriftgutverwaltung ist die/der BWG-Archivbeauftragte. Sie/Er wird vom Vorstand ernannt. Vorschlagsberechtigt sind die Klassen.

(2) Die/Der BWG-Archivbeauftragte leitet die Geschäftsstelle hinsichtlich der Art und Dauer des zu sichernden Schriftguts bzw. zu sichernder Unterlagen. Sie/Er ermittelt das Schriftgut, das nach Ablauf der Aufbewahrungsfrist oder wegen sonstiger Gründe auszusondern ist, und organisiert dessen im Original vorzunehmende Anbietung an das Niedersächsische Landesarchiv Abteilung Wolfenbüttel. Das Weitere regelt das Niedersächsische Archivgesetz (NArchG) in seiner jeweils aktuellen Fassung.

§ 26 Haushalt und Rechnungsprüfung

(1) Der Haushaltsplan ist vor Beginn des Haushaltsjahres (Kalenderjahr) aufzustellen. Er wird von der Plenarversammlung beschlossen.

(2) Die Gesellschaft hat nach dem Ende eines jeden Haushaltsjahres eine Rechnung aufzustellen. Die Rechnung ist, unbeschadet einer Prüfung durch den Landesrechnungshof gemäß § 111 Niedersächsische LHO, durch ein in einem ordnungsgemäßen Vergabeverfahren ermitteltes Wirtschaftsprüfungsunternehmen zu prüfen. Die Prüfung erstreckt sich auf die Ordnungsmäßigkeit der Rechnungslegung und auf die satzungsgemäße Verwendung der Mittel.

4 Abschnitt IV: Schlussbestimmungen (§§ 27–29)

§ 27 Änderung der Satzung

Änderungen der Satzung erfolgen durch Beschluss der Plenarversammlung in dem von der Geschäftsordnung zu § 8 Abs. 4 bestimmten Verfahren.

§ 28 Rechtsaufsicht des Landes

(1) Die Wahl der Präsidentin/des Präsidenten und der Vizepräsident(inn)en ist dem zuständigen Ministerium der Landesregierung anzuzeigen. Gleiches gilt für die Ergebnisse der Wahlen der ordentlichen Mitglieder und der Klassenvorsitzenden, für den Ausschluss eines Mitglieds aus der BWG und für den Verzicht eines Mitglieds auf seine Mitgliedschaft.

(2) Der Haushaltsplan, Änderungen der Satzung und die Entlastung des Vorstands bedürfen der Genehmigung durch das zuständige Ministerium der Landesregierung.

§ 29 Inkrafttreten

Die Satzung tritt mit dem Tag der Genehmigung in Kraft.

Tag der Genehmigung: 15.02.2023

5 Anhänge zur Satzung der BWG:

6 Geschäftsordnungen und Bestimmungen

1. Geschäftsordnung zur Plenarversammlung: Anhang zu § 8
2. Geschäftsordnung des Vorstands: Anhang zu § 9
3. Geschäftsordnung über die Zuwahlen: Anhang zu § 4 sowie § 5 Abs. 5
4. Geschäftsordnung der Jungen BWG (JBWG): Anhang zu § 6
5. Geschäftsordnung über Kommissionen und Querschnittsbereiche: Anhang zu § 19
6. Bestimmungen für die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille: Anhang zu § 8 Abs. 2.
7. Bestimmungen über die Mitwirkung der BWG an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises: Anhang zu § 8 Abs. 2.

1. Geschäftsordnung zur Plenarversammlung: Anhang zu § 8

Gemäß § 8 Abs. 8 der Satzung gelten für die Durchführung von Plenarversammlungen ergänzend folgende Vorschriften.

§ 1 Sind die Präsidentin/der Präsident und die/der dienstälteste Vizepräsidentin/Vizepräsident an der Ausübung ihrer Ämter verhindert, nimmt ihre Geschäfte die zweite Vizepräsidentin/der zweite Vizepräsident wahr. Ist auch sie/er verhindert, tritt die/der dienstälteste Klassenvorsitzende an ihre/seine Stelle.

§ 2 Die Plenarsitzungen werden protokolliert. Die Durchführung regelt § 14 Abs. 5 der Satzung. Über Einsprüche gegen das Protokoll entscheidet der Vorstand. Einsprüche und deren Zurückweisung sind dem Protokoll in einem Anhang beizufügen.

§ 3 Die Protokolle der Plenarsitzungen können in der Geschäftsstelle der BWG von den ordentlichen Mitgliedern während der Dienststunden eingesehen werden.

§ 4 Das Recht, Vorschläge für Beschlüsse gemäß § 8 Abs. 3 und 4 der Satzung einzubringen, haben die Präsidentin/der Präsident, der Vorstand, jede Klasse sowie jedes stimmberechtigte Mitglied. Die Entwürfe der Vorschläge sind den Mitgliedern

zusammen mit der Tagesordnung fristgerecht zuzusenden. Ausnahmsweise sind Tischvorlagen geringen Umfanges zur Änderung einzelner Vorschriften zulässig.

§ 5 Die Plenarversammlung wählt in geheimer Wahl die Präsidentin/den Präsidenten und die Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten in getrennten Wahlgängen.

§ 6 Die Wahlen und die Beschlüsse über Satzungsänderungen erfordern eine Stimmenmehrheit von zwei Dritteln aller anwesenden stimmberechtigten Mitglieder. Führt bei der Wahl der Präsidentin/des Präsidenten und der Vizepräsidentinnen/Vizepräsidenten der erste Wahlgang zu keiner Zweidrittelmehrheit, so findet sofort ein zweiter Wahlgang statt. Wird auch hierbei die Zweidrittelmehrheit nicht erzielt, so ist in einem dritten Wahlgang gewählt, wer die absolute Mehrheit erreicht. Sollte eine absolute Mehrheit von keiner/keinem der Kandidierenden erreicht werden, wird eine Stichwahl durchgeführt.

§ 7 Bei den übrigen Beschlussfassungen und sonstigen Abstimmungen entscheidet die einfache Mehrheit der stimmberechtigten Anwesenden.

§ 8 Die Plenarversammlung entscheidet auf Antrag eines Mitglieds über die Entlastung des Vorstands.

§ 9 Die Plenarversammlung hört und erörtert Rechenschaftsberichte. Die Kommissionen, Querschnittsbereiche und Arbeitsgruppen sind verpflichtet, über den Stand ihrer Tätigkeit, auf Anforderung der Sitzungsleitung auch schriftlich, zu berichten. Die Mitglieder können über ihre Forschungsarbeiten berichten.

2. Geschäftsordnung des Vorstands: Anhang zu § 9

Gemäß § 9 Abs. 6 gelten für die Sitzungen des Vorstands ergänzend folgende Vorschriften:

§ 1 Ordentliche Sitzungen des Vorstands werden von der Präsidentin/dem Präsidenten, im Falle ihrer/seiner Verhinderung von der dienstältesten Vizepräsidentin/dem dienstältesten Vizepräsidenten grundsätzlich mit einer Frist von drei Wochen unter Beifügung einer Tagesordnung und evtl. Anlagen einberufen.

§ 2 Der Vorstand ist beschlussfähig, wenn mindestens die Hälfte seiner Mitglieder anwesend ist.

§ 3 Sind die Präsidentin/der Präsident und die dienstälteste Vizepräsidentin/der dienstälteste Vizepräsident verhindert, wird die Sitzung von der zweiten Vizepräsidentin/dem zweiten Vizepräsidenten geleitet. Ist auch sie/er verhindert, tritt die/der dienstälteste Klassenvorsitzende an ihre/seine Stelle.

§ 4 Beschlüsse fasst der Vorstand mit der absoluten Mehrheit der Mitglieder. § 10 (1) bleibt unberührt. Ist lediglich die Hälfte der Mitglieder anwesend, bedarf es der Einstimmigkeit.

§ 5 Über die Sitzung wird ein Protokoll geführt; dafür ist die Präsidentin/der Präsident verantwortlich. Das Protokoll wird auf der nächsten Sitzung verabschiedet. Die verabschiedeten Protokolle werden in der BWG-Geschäftsstelle abgelegt und stehen den Mitgliedern des Vorstands zur Einsichtnahme offen.

§ 6 Außerordentliche Sitzungen des Vorstands können über den Fall des § 9 Abs. 5 der Satzung hinaus auch von der Präsidentin/dem Präsidenten der BWG nach ihrem/seinem Ermessen einberufen werden. Die Fristbestimmung des § 1 GO gilt nicht. Die Beschlussfähigkeit ist abweichend von § 2 nur gegeben, wenn alle Klassenvorsitzenden anwesend sind.

3. Geschäftsordnung über die Zuwahlen: Anhang zu § 4 sowie § 5 Abs. 5

§ 1 Der Antrag auf Zuwahl eines ordentlichen oder korrespondierenden Mitglieds ist der fachlich zuständigen Klasse schriftlich und von mindestens 3 ordentlichen Mitgliedern unterzeichnet zuzuleiten. Der Antrag muss den vollen Namen und die akademischen Grade der/des Vorgeschlagenen sowie deren/dessen wissenschaftliches Fachgebiet, ihre/seine berufliche Stellung und ihren/seinen Wohnsitz enthalten. Von den einen Antrag stellenden Mitgliedern soll mindestens eines der fachlich zuständigen Klasse angehören.

§ 2 Nach allgemeiner Erörterung des Antrages mit den Antragstellern der fachlich zuständigen Klasse setzt diese einen Dreier-Ausschuss ein, der den Antrag im Einzelnen prüft, wobei der

- a) den Lebenslauf der/des Vorgeschlagenen,
- b) ihre/seine wissenschaftliche Tätigkeit, Leistungen und Verdienste,
- c) ihre/seine Veröffentlichungen und
- d) die von der/dem Vorgeschlagenen für wissenschaftliche Verdienste empfangenen Ehrungen zugrunde legt.

Dem Ausschuss dürfen höchstens zwei der Antragsteller/innen angehören.

§ 3 Zur Beurteilung des Antrages werden Gutachten, nach Möglichkeit von Mitgliedern einer Akademie der Wissenschaften, herangezogen. Bei der Auswahl der Gutachter/innen sind die Leitlinien der DFG zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis zu beachten.

Ist die/der Vorgeschlagene selbst Mitglied einer Akademie der Wissenschaften der Bundesrepublik Deutschland oder Inhaber/in der Gauß-Medaille oder anderer hoher wissenschaftlicher Auszeichnungen, kann auf die Heranziehung von Gutachten verzichtet werden.

§ 4 Nach Prüfung der Unterlagen gemäß § 2 und § 3 nimmt der Ausschuss schriftlich Stellung und empfiehlt Annahme oder Ablehnung des Antrages. Die Stellungnahme des Ausschusses mit dem Zuwahlantrag sowie den Unterlagen zur Person des/der Vorgeschlagenen gemäß § 2 a-d ist der Klasse zuzuleiten.

§ 5 Die Klasse erörtert nochmals den ihr zugeleiteten Antrag auf Zuwahl und dessen Beurteilung durch den Ausschuss und beschließt mit Zweidrittel-Mehrheit über dessen Vorlage im Plenum. Im Falle der Einbringung des Vorschlages ins Plenum ist dies der Präsidentin/dem Präsidenten unter Übersendung der Unterlagen gemäß § 4 und Bekanntgabe des Klassenvotums anzuzeigen.

§ 6 Die Präsidentin/Der Präsident teilt allen ordentlichen Mitgliedern drei Wochen vor dem Wahltermin die anstehenden Anträge auf Zuwahl vertraulich mit,

unter Bekanntgabe der wichtigsten Persönlichkeitsdaten der vorgeschlagenen Person(en).

§ 7 Ein/e Angehörige/r der Klasse trägt dem Plenum die Vorschläge auf Zuwahl mit Begründung und Bekanntgabe der Klassenvoten vor.

§ 8 Das Plenum entscheidet sodann über die Aufnahme der Vorgeschlagenen gemäß § 14 Abs. 1 und 2 der Satzung.

§ 9 Zuwahlen finden in der Regel alljährlich zweimal statt; hierzu lädt die Präsidentin/der Präsident mit einer Frist von drei Wochen ein.

§ 10 Der Antrag auf Zuwahl von Ehrenmitgliedern und außerordentlichen Mitgliedern erfolgt analog zu den Regeln der Zuwahl ordentlicher und korrespondierender Mitglieder, wobei der Vorstand an die Stelle der fachlich zuständigen Klasse tritt. § 2, § 3 und § 4 entfallen.

4. Geschäftsordnung der Jungen BWG: Anhang zu § 6 Abs. 4

§ 1 Die Mitgliedschaft in der JBWG richtet sich an promovierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die nach der Promotion eine mindestens zweijährige Berufserfahrung in Wissenschaft, Kultur oder Wirtschaft nachweisen können. Die Ernennung zum Mitglied erfolgt durch die Präsidentin/den Präsidenten der BWG. Die JBWG entscheidet über Aufnahmeempfehlungen an die Präsidentin/den Präsidenten. Vorschläge zur Aufnahme können sowohl von Mitgliedern der JBWG als auch von Mitgliedern der BWG eingebracht werden.

§ 2 Der JBWG gehören maximal 30 Mitglieder an. Es wird angestrebt, dass maximal fünf Mitglieder aus einer Wissenschaftsdisziplin kommen.

§ 3 Die Mitglieder der JBWG erhalten für die Dauer ihrer Mitgliedschaft den Status eines Gastes in den Klassen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. Mitglieder können nur einer Klasse angehören.

§ 4 Die Mitgliedschaft in der JBWG ist in der Regel auf sechs Jahre beschränkt.

§ 5 Jährlich muss mindestens eine ordentliche Mitgliederversammlung der JBWG in Braunschweig durchgeführt werden. Sie ist beschlussfähig, wenn die Mehrheit der Mitglieder anwesend ist. Stimmübertragung ist ausgeschlossen.

§ 6 Die Versammlung der Mitglieder der JBWG wählt für zwei Jahre einen Vorstand. Ihm gehören eine Sprecherin/ein Sprecher und zwei stellvertretende Sprecher/innen sowie eine Medien-Managerin/ein Medien-Manager an. Der Vorstand ist für die Einberufung und Durchführung der Sitzungen der JBWG verantwortlich und vertritt die JBWG nach außen und innerhalb der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

5. Geschäftsordnung über Kommissionen und Querschnittsbereiche: Anhang zu §19

§ 1 Kommissionen dienen der Durchführung besonderer Forschungsvorhaben, Querschnittsbereiche dienen der Durchführung transdisziplinärer Forschungsvorhaben und der Reflexion ihrer Methoden. Ein Querschnittsbereich umfasst Mitglieder aus mindestens zwei Klassen. Kommissionen und Querschnittsbereiche werden auf Antrag einer Klasse von der Plenarversammlung eingerichtet.

§ 2 Die Mitglieder der Kommissionen und Querschnittsbereiche werden auf Vorschlag der beteiligten Klassen von der Präsidentin/dem Präsidenten berufen. Den Kommissionen und Querschnittsbereichen können neben Mitgliedern der BWG auch Wissenschaftler/innen angehören, die nicht Mitglied der BWG sind. Die Mitglieder der Kommissionen und Querschnittsbereiche verpflichten sich zur forscherschen Mitarbeit und regelmäßigen Teilnahme an den Sitzungen und weiteren Aktivitäten.

§ 3 Die Leitung einer Kommission bzw. eines Querschnittsbereichs muss von einem Mitglied der BWG wahrgenommen werden, das auf Vorschlag der beantragenden Klasse von der Präsidentin/dem Präsidenten berufen wird. Die Leiterin/der Leiter koordiniert, organisiert und leitet die Sitzungen und vertritt die Kommission bzw. den Querschnittsbereich nach innen und nach außen. Die Tätigkeit endet, wenn das der Kommission bzw. dem Querschnittsbereich zugrunde liegende Vorhaben abgeschlossen ist.

§ 4 Die Leiter/innen der Kommissionen und Querschnittsbereiche berichten alljährlich zum Jahresschluss über die Tätigkeit des abgelaufenen Jahres und legen dem Plenum fertigestellte Abschlussberichte über das jeweils durchgeführte Vorhaben vor.

§ 5 Die abgeschlossenen Arbeiten der Kommissionen und Querschnittsbereiche werden nach Maßgabe der hierfür zur Verfügung stehenden Mittel veröffentlicht. Auf die BWG ist entsprechend hinzuweisen.

§ 6 Die Präsidentin/der Präsident bestellt auf Vorschlag der beantragenden Klasse eine Geschäftsführerin/einen Geschäftsführer der Kommission bzw. des Querschnittsbereichs, die/der nicht Mitglied der BWG sein muss und deren/dessen Tätigkeit ebenfalls mit dem Abschluss des jeweiligen Vorhabens endet.

§ 7 Die laufenden Verwaltungsgeschäfte der Kommissionen und Querschnittsbereiche werden von der Geschäftsstelle der BWG wahrgenommen.

§ 8 Die Transdisziplinaritätsbeauftragten der Klassen haben, soweit sie nicht Mitglieder des jeweiligen Querschnittsbereichs sind, ständiges Gastrecht zur Teilnahme an den Sitzungen. Sie berichten in den Klassensitzungen über Aktivitäten der Querschnittsbereiche und sondieren klassenintern mögliche thematische und personelle Anknüpfungspunkte. Diese Aufgabe kann auf Vorschlag der/des Klassenvorsitzenden auch von einem anderen Mitglied der Klasse wahrgenommen werden, das einem Querschnittsbereich angehört.

§ 9 Die Mitgliedschaft und Ämter in den Kommissionen und Querschnittsbereichen sind ehrenamtlich und bleiben unbesoldet. Von der Kommission bzw.

Querschnittsbereichen beschlossene und vom Vorstand der BWG genehmigte Auslagen werden den Genannten nach den entsprechenden Sätzen des öffentlichen Dienstes erstattet.

6. Bestimmungen für die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille: Anhang zu § 8 Abs. 2

§ 1 Verleihung der Medaille

- (1) Die Medaille wird von der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft verliehen und im Rahmen der öffentlichen Feierlichen Jahreshauptversammlung durch die Präsidentin/den Präsidenten überreicht. Die/Der Geehrte soll bei dieser Gelegenheit über ihre/seine wissenschaftliche Arbeit vortragen.
- (2) Mitgliedern der Gesellschaft wird die Medaille nicht verliehen.

§ 2 Verfahren

- (1) Jedes Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft hat das Recht, der Gesellschaft Vorschläge zur Verleihung der Gauß-Medaille zu unterbreiten. Die Auswahl der Preisträgerin/des Preisträgers wechselt turnusmäßig zwischen den drei Klassen der BWG. Die/Der jeweilige Klassenvorsitzende stellt die Vorschläge zur Beratung. Der Vorschlag der jeweiligen Klasse soll schriftlich mit Begründung spätestens zum 1. Juni des Vorjahres bei der Präsidentin/dem Präsidenten eingehen. Die Präsidentin/der Präsident ermittelt die Annahmefähigkeit der/des Vorgeschlagenen.
- (2) Nach Eingang aller Unterlagen beruft die Präsidentin/der Präsident die Plenarversammlung zur endgültigen Beschlussfassung ein.
- (3) Das gesamte Verfahren ist vertraulich zu behandeln.

§ 3 Besondere Bestimmungen

- (1) Die Verleihung der Gauß-Medaille schließt eine Berufung zum Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft nicht ein.
- (2) Die Verleihung sowie der Wortlaut der Verleihungsurkunde werden jeweils in dem der Verleihung folgenden Jahrbuch der Gesellschaft veröffentlicht und dem zuständigen Ministerium der Landesregierung sowie den deutschen wissenschaftlichen Akademien mitgeteilt.

7. Bestimmungen über die Mitwirkung der BWG an der Verleihung des Abt-Jerusalem-Preises: Anhang zu §8 Abs. 2

§ 1 Die Präsidentin/Der Präsident der BWG benennt im Einvernehmen mit dem Vorstand die Repräsentantin/den Repräsentanten der BWG in der Findungskommission für die Trägerin/den Träger des Abt-Jerusalem-Preises.

§ 2 Der Vorstand der BWG entscheidet über die Person, die die Laudatio auf die/den Abt-Jerusalem-Preisträger/in hält.

§ 3 Die inhaltliche Vorbereitung des Preiskolloquiums verantwortet die BWG.

§ 4 Die Laudatio und der Wortlaut der Verleihungsurkunde sowie der Vortrag der/des Geehrten werden in dem der Verleihung folgenden Jahr im Jahrbuch der BWG veröffentlicht.

NEUJAHRSSITZUNG
der
Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft
am 28. Januar 2023

Begrüßung – Rückblick – Übergabe des Präsidentenamtes

OTTO RICHTER

Liebe Kolleginnen und Kollegen, liebe Gäste. Herzlich willkommen zur Neujahrssitzung 2023.

Ich begrüße die Mitglieder des Rates der Stadt Braunschweig Frau Maul (CDU), Herrn Flake (SPD), Herrn Pries (BIBS) verbunden mit dem Dank an die Stadt Braunschweig für Ihre Unterstützung der BWG. Als Vertreter der Stadt Braunschweig begrüße ich Herrn Dr. Steinführer, den Direktor des Stadtarchivs Braunschweig. Ich begrüße Frau Brigitte Blum und Herrn Prof. Henke von der Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis, Herrn Prof. Biegel vom Institut für Regionalgeschichte und Frau Bettina Vogler-Klages, Geschäftsführendes Vorstandsmitglied der Eckensberger-Stiftung.

Ich freue mich, Herrn Prof. Heinig, Dekan der Juristischen Fakultät der Universität Göttingen, begrüßen zu können.

Bevor wir in die Tagesordnung eintreten, möchte ich unserer verstorbenen Mitglieder gedenken.

Wir trauern um

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Bohnet**, emeritierter Professor und Direktor des Instituts für Chemische und Thermische Verfahrenstechnik, Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1984

Prof. Dr. phil. **Franz Rudolf Keßler**, emeritierter Universitätsprofessor der Physik, Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1969, korrespondierendes Mitglied seit 1992

Prof. Dr.-Ing. **Hans-Georg Unger**, emeritierter Universitätsprofessor für Hochfrequenztechnik, Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1965

Prof. Dr. **Peter Behrens**, Professor am Institut für Anorganische Chemie an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 2003

Ich bitte Sie, innezuhalten im Gedenken an die Verstorbenen.

Ich habe meine 2. Amtszeit unter den Einschränkungen der Corona-Pandemie und mit der Hypothek des Konfliktes um eine neue zeitgemäße Satzung beginnen müssen. Es wurde auf Beschluss des Verwaltungsausschusses eine Arbeitsgruppe zur Diskussion der Änderungsvorschläge des vorliegenden Satzungsentwurfs eingerichtet. Der in der Arbeitsgruppe überarbeitete Entwurf der Neufassung der Satzung wurde den Mitgliedern der BWG zugesendet. Kommentare und Änderungsvorschläge wurden von der AG aufgenommen und wurden in den Entwurf eingearbeitet. In der Plenarversammlung vom 16. Dezember 2022 wurde der Entwurf mit großer Mehrheit angenommen. Ich danke den Mitgliedern der Arbeitsgruppe für ihre exzellente Arbeit und insbesondere dem Vorsitzenden, Prof. Hanschke, für die gelungene Moderation. Damit kann ich meinem Nachfolger Prof. Haux die BWG ohne unerledigte Aufgaben übergeben.

Nach dem Abklingen der Corona-Pandemie wurden alle wesentlichen Veranstaltungen in Präsenz durchgeführt, wobei das Online-Format beibehalten wurde.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bedanken bei Frau Mumcu und Frau Rotermund, die in der schwierigen Zeit der Pandemie wie selbstverständlich die neuen Formate der Kommunikation aufgegriffen haben. Ich bedanke mich bei Frau Karatas, die kurzfristig für Frau Mumcu eingesprungen ist.

Zuwahlen

Geisteswissenschaften

Prof. Dr. phil. habil. **Andreas Hetzel**, Institut für Philosophie, Kulturwissenschaften und ästhetische Kommunikation, Stiftung Universität Hildesheim

Ingenieurwissenschaften

Prof. Dr.-Ing. **Dirk Lowke**, Universitätsprofessor, Technische Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB)

Prof. **Udo Nackenhorst**, Universität Hannover, Fachgebiet Baumechanik und numerische Mathematik

Prof. **Sebastian Thrun**, USA, Gauß-Medaille 2021, Fachgebiet Robotik, korrespondierendes Mitglied

Mathematik und Naturwissenschaften
Prof. **Uwe Morgner**, Universität Hannover, Fachgebiet Quantenoptik

Junge BWG

Die Junge BWG war auch in diesem 2. Corona-Jahr sehr aktiv.

Zugewählt wurden in die JBWG:

Dr. **Maren Schubert**

Prof. Dr. **Iordania Constantinou**

Prof. Dr. rer.nat. **Antje Wulff**

Dr. **Inka Mai**

Prof. Dr. **Jonny Proppe**

Dr. **Aidin Lak**

Dr. **Jacob Blumenfeld**

Dr. **Michael Zopf**

Dr. **Esther Greussing**

Die **Gauß-Medaille 2022** wurde an Prof. Sebastian Thrun verliehen. Sebastian Thrun gilt als internationaler Spitzenforscher im Bereich Robotik und autonomes Fahren. Das Wissenschaftliches Kolloquium in der Dornse mit dem Thema „**Mobilität der Zukunft**“ und die Jahresfeier werden live über YouTube übertragen.

Die **Verleihung des Abt Jerusalem-Preises**, der im Jahre 2021 wegen der Pandemie abgesagt werden musste, fand im Juni 2022 statt. Der Abt Jerusalem-Preis 2021 wurde an die Biochemikerin und Informatikerin Katharina Zweig verliehen. Frau Zweig ist Professorin für Graphentheorie und Analyse komplexer Netzwerke am Fachbereich Informatik der TU Kaiserslautern. An der Schnittstelle interdisziplinärer Diskurse befasst sich Frau Zweig in Forschung und Lehre sowie in ihrem außeruniversitären öffentlichen Wirken mit gesellschaftlich hoch relevanten Schlüsselthemen der Digitalisierung. Übergreifendes Thema des Preiskolloquiums war „**Das Menschenbild der künstlichen Intelligenz**“.

Öffentliche Wissenschaft

Akademie-Vorlesungen

Die Akademievorlesungen im Schloss wurden über ein Jahrzehnt lang von **Prof. Gahl** gestaltet. Die letzte Vorlesungsreihe, die im Jahr 2022 abgeschlossen wurde, behandelte das Rahmenthema „Schlaf und Traum“. Das Spektrum der Vorträge reichte von der Schlafphysiologie bis zu „Schlaf und Traum im Alten Testament und im alten Orient“.

Die Akademievorlesungen werden seit 2022 vom Vizepräsidenten Harald Budelmann weitergeführt. Unter dem Titel „**In Bewegung: Technologischer Wandel und Gesellschaft**“ wirft die aktuelle Vortragsreihe einen Blick in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft technischer Entwicklungen und auf deren spannende Beziehung zu Veränderungsprozessen in der Gesellschaft. Die Reihe wurde eingeleitet durch einen Vortrag von Prof. Renn zum Thema: „Umgang mit Technikkonflikten – Orientierung in postfaktischen Zeiten für den Dialog zum Verhältnis von Technik und Gesellschaft“.

Bioethik-Symposium

Weiterer Höhepunkt war das nunmehr **18. Bioethik-Symposium** zu dem aktuellen Thema „mRNA-Arzneimittel – nicht nur als Impfstoff“, wie immer hervorragend geplant von Prof. Müller-Goymann und Prof. Gahl.

Vortragsreihen im Science Center phaeno in Wolfsburg

Diese Vortragsreihen sind eine gemeinsame Veranstaltung der AdW Göttingen und der BWG. Rahmenthemen der letzten beiden Jahre waren „**Folgen des Klimawandels**“ und „**Wahrnehmung**“. Die Vortragsreihen, die als Hybridveranstaltung durchgeführt wurden, haben einen großen Anklang gefunden. Die Aufzeichnungen sind im Internet über die Homepage der BWG abrufbar.

BWG-Kommission Synergie und Intelligenz (SYnENZ)

Die Projektarbeit hat durch die Pandemie keine Einschränkungen erfahren. Durch die Integration von nicht der BWG angehörigen Wissenschaftlern/innen aus der Forschungsregion in Projekte der BWG wird die Bedeutung der BWG als Plattform inter- und transdisziplinärer Forschung in der Region deutlich. Die Kommissionsarbeit gehört neben der Bewertung und Vermittlung der Ergebnisse von Wissenschaft und Technik zum Selbstverständnis einer Akademie. 1930 erklärte

der Präsident der Heidelberger Akademie Hans von Schubert bei der Jahresfeier: „Eine Akademie erfüllt [...] erst dann ihren eigentlichen Zweck, wenn sie selbst größere Unternehmungen in die Wege zu leiten [...] vermag.“

Die Kommission Synergie und Intelligenz befasst sich in grundsätzlicher Weise mit den technischen, ethischen und rechtlichen Herausforderungen des Zusammenwirkens lebender und nicht lebender Entitäten, die im Zeitalter der Digitalisierung möglich geworden sind.

Zusätzlich zu den regulären Sitzungen wurde im Sommer 2022 ein ganztägiger Workshop mit den Schwerpunkten

- Projektvorstellungen von Mitgliedern
- Vorstellung des Graduiertenkollegs & Diskussion
- Vorbereitung des SYnENZ-Symposiums 2023

durchgeführt.

Zusammenarbeit mit der AdW Göttingen

Unter der Führung von Prof. Reitner, AdW Göttingen, wurden zwei geologische Exkursionen zu den Themen Geologie des nördlichen Harzvorlandes und Geologie des südlichen Harzvorlandes durchgeführt.

Thema der gemeinsamen Sitzung von BWG und der AdW in Braunschweig war der Ursprung des Lebens auf der Erde aus geologischer und biochemischer Sicht mit den Vorträgen:

- Prof. **Joachim Reitner**, Geowissenschaftliches Zentrum, Abteilung Geobiologie, Georg-August-Universität Göttingen, Mitglied der AdW,
- Prof. Dr. **Jan-Peter Duda**, ebenfalls Göttingen: „Archaische Biosignaturen: Fossilien früher mikrobieller Gemeinschaften?“,
- Prof. **Andreas Kirschning**, Institut für Organische Chemie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Mitglied der BWG: „Annäherungen an den Ursprung des Lebens – von der präbiotischen Chemie zu den ersten Formen des Lebens“.

Zum Schluss einige Gedanken zu wissenschaftlichen Akademien und insbesondere zu unserer BWG. Ich habe es immer als Privileg empfunden, mich in so einem geschützten akademischen Raum aufhalten zu können.

Dieser Raum bietet Muße

- zur Reflexion über Wissenschaft ohne den Zwang zur unmittelbaren Verwertung;
- zum gegenseitigen Lernen über die Fächergrenzen hinweg;
- zur gemeinschaftlichen Bearbeitung von Themen, die in keine der festfügten Fachdisziplinen passen;
- für das Erleben von Wissenschaft in einem feierlichen und traditionellen Rahmen;
- zum wissenschaftlichen Austausch mit anderen Akademien.

Dieser geschützte Raum ist fragil und immer bedroht von Strömungen des Zeitgeistes festgemacht an Begriffen wie „Cancel Culture“ und „Political Correctness“, welche das höchste Gut von „Academia“, die verfassungsrechtlich verbürgte Freiheit von Forschung und Lehre zunehmend unter moralische und politische Vorbehalte stellen.

Wissenschaftliche Akademien haben eine lange Geschichte in Europa und es erfüllt mich mit Stolz in dieser Tradition zu stehen und diese mit den Erkenntnissen und den Instrumenten, die uns heute zur Verfügung stehen, weiterzuführen.

Dazu ein Zitat aus der Gründungszeit der ersten wissenschaftlichen Akademie in Europa, der **Academia nazionale dei Lincei (Luchsäugigen)**, über das Selbstverständnis dieser wissenschaftlichen Gesellschaft.

*Finis eius est rerum cognitionem
et sapientiam non solum acquirere,
recte, pieque simul vivendo; sed et
hominibus voce et scriptis absque
ullius noxa pacifice pandere.*
(Lynceographum, I, 15–19, ca. 1605–1612)

Ihr Ziel ist: die Erkenntnis der Dinge und Weisheit sowohl zu erlangen und richtig und fromm zu leben, als auch sie in Wort und Schrift, ohne irgend zu schden, friedlich zu verbreiten.

Hier werden zwei Ziele der Arbeit wissenschaftlicher Akademien formuliert, die auch heute noch Geltung haben: Wissen zu erlangen und aus der wissenschaftlichen Arbeit heraus Wissen zu verbreiten.

Ich wünsche der BWG und Ihnen, lieber Herr Haux, viel Erfolg bei der Verfolgung dieser Ziele und Ihnen allen ein gesundes und erfolgreiches neues Jahr.

Erhalten und Erneuern, immer im Sinne der Ziele der BWG

Antrittsrede auf der Neujahrssitzung 2023

REINHOLD HAUX

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Sehr geehrte Ehrengäste, sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Mitglieder der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft!

Von einem neu gewählten Präsidenten wird erwartet, seine Überlegungen für die Zeit seiner Präsidentschaft vorzustellen. Diese Überlegungen, die ich in dieser Antrittsrede skizziere, möchte ich unter ein Leitthema stellen:

Erhalten und erneuern, immer im Sinne der Ziele der BWG.

Sie werden den Aphorismus vermutlich kennen:

„Tradition ist nicht das Halten der Asche, sondern das Weitergeben der Flamme“ ([1]).

Die BWG ist eine traditionsreiche Gelehrten-gesellschaft mit großem wissenschaftlichem Potenzial. Sie wird in diesem Jahr 80 Jahre alt. „*Erhalten und erneuern*“ sollten wir im Sinne der Weitergabe der Flamme verstehen. Durch den gesetzten Rahmen „*immer im Sinne der Ziele der BWG*“ bilden sie auch keinen Widerspruch; im Gegenteil: sie benötigen sich gegenseitig.

1 Ziele der BWG

Was sind nun die Ziele der BWG? Hier kann ich auf die Satzung verweisen. Dort steht in der Präambel:

„Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (BWG) ist eine Vereinigung von Gelehrten. Sie hat zum Ziel, sich forschend, fördernd und vermittelnd mit den gesamtgesellschaftlichen Leistungen von Wissenschaft und Technik in einem steten interdisziplinären Diskurs auseinanderzusetzen. So trägt sie zur Bildung einer wissensorientierten Gesellschaft bei. Dabei sind die Technik-wissenschaften sowohl mit den Naturwissenschaften und der Mathematik als auch mit den Geistes- und Sozialwissenschaften transdisziplinär verbunden. Das integrative Zusammenwirken ermöglicht die Transformation von akademischem zu beratungsorientiertem Wissen. Die Arbeit der BWG ist zielorientiert und wertebasiert. Ihre Mitglieder pflegen den fächerübergreifenden Dialog. ...“ ([2]).

Und in § 1 wird festgehalten:

„Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft dient der Förderung der Wissenschaften und ihrer Zusammenarbeit. Sie kooperiert mit anderen Wissenschafts- und Bildungsinstitutionen und unterstützt die öffentliche Teilhabe an Forschung und Entwicklung. Mit der Expertise ihrer Mitglieder steht sie Politik und Medien als Ansprechpartnerin zur Verfügung. Sie fördert junge Wissenschaftlerinnen und junge Wissenschaftler. Sie verleiht Auszeichnungen für erfolgreiche wissenschaftliche Leistungen.“ ([2]).

2 Aufgaben der BWG

Diese Ziele gilt es auf die Aufgaben, auf die Aktivitäten der BWG abzubilden – „erhalten“ – und diese Abbildung auch immer wieder zu prüfen – „erneuern“. Mein Vorgänger im Präsidentenamt, Professor Otto Richter, hat in seinem Rückblick über diese Aktivitäten der BWG berichtet, sodass ich mich hier auf ‚Strukturelles‘ konzentrieren kann und lediglich auf einige der in diesem Jahr anstehenden Aktivitäten hinweisen möchte.

Die Aufgaben der BWG möchte in drei Teile untergliedern:

- Pflege des fächerübergreifenden Dialogs und Wissensvermittlung,
- Kooperation und Austausch mit anderen Institutionen sowie
- Selbstergänzung und interne Organisation.

2.1 Pflege des fächerübergreifenden Dialogs und Wissensvermittlung

Zur ersten Aufgabe: Pflege des fächerübergreifenden Dialogs und Wissensvermittlung. Diese betrachte ich als die zentrale Aufgabe der BWG. Die beiden anderen Aufgaben sind ebenfalls von Bedeutung und durchaus ebenfalls arbeitsintensiv. Sie machen jedoch nur dann Sinn, wenn die BWG diesen fächerübergreifenden Dialog führt, wenn sie Wissen vermittelt und wenn sie damit zur **Bildung** einer **wissensorientierten Gesellschaft** beiträgt, das Kürzel BWG sozusagen im doppelten Sinne zurecht führen darf.

Diese Aufgabe untergliedert sich meines Erachtens in drei Teile:

- den internen fachlichen Austausch,
- die öffentlichen Veranstaltungen und Preisverleihungen und
- die fächerübergreifenden Arbeiten zu wichtigen Themen.

2.1.1 Der interne fachliche Austausch

Der interne fachliche Austausch geschieht vor allem über Vorträge und Diskussionen, aber auch durch Besichtigungen und Exkursionen. Und er geschieht häufig über die jeweiligen Fachgrenzen hinweg. Dieser fachliche Austausch hilft, neue Perspektiven zu wichtigen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Themen zu

gewinnen. Und er hilft auch, methodische Ansätze aus anderen Fachgebieten besser zu verstehen und die methodischen Ansätze des eigenen Fachgebiets noch intensiver zu reflektieren.

Dieser Austausch geschieht vor allem, aber bei weitem nicht nur, in den Sitzungen der drei Klassen – Geisteswissenschaften, Ingenieurwissenschaften sowie Mathematik und Naturwissenschaften –, in denen der Jungen BWG und in den gemeinsamen Plenarversammlungen. Die Treffen finden überwiegend im BWG-Haus statt, aber auch beispielsweise in Räumlichkeiten der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Leibniz Universität Hannover.

Zum Thema *erhalten und erneuern*: Bedingt durch die Corona-Pandemie hat dieser so wichtige Austausch während der letzten drei Jahre gelitten. Hier wird es eine Aufgabe sein, ihn wieder zu intensivieren. Wir werden uns wieder verstärkt im BWG-Haus dazu treffen. Aber wir werden für diesen Austausch weit intensiver, als wir dies vor der Pandemie getan haben, die Möglichkeiten der virtuellen Teilnahme nutzen. Es wird meines Erachtens für uns alle weiter wichtig bleiben, sich wie in der heutigen Neujahrssitzung in Präsenz treffen zu können. Aber man muss nicht in jedem Treffen immer physisch, sondern kann durchaus auch teilweise virtuell teilnehmen. Jeder von uns kann über Probleme auf der A2 berichten. Bei unseren internationalen Aktivitäten haben wir dieses gemeinsame virtuelle Arbeiten ja schon seit vielen Jahren praktiziert.

2.1.2 Die öffentlichen Veranstaltungen und Preisverleihungen

Über die Aufgaben bei öffentlichen Veranstaltungen und die Preisverleihungen hatte Otto Richter in seinem Rückblick berichtet. Diese werden auch in Zukunft weiter fortgesetzt. Und nach der Pandemie wird es auch wieder leichter sein, sich zu treffen. Nur einige wenige der zahlreichen Aktivitäten in diesem Jahr möchte ich hier nennen:

- Die Akademievorlesungen im Schloss werden in diesem Jahr unter dem Thema „Mobilität in der Zukunft: bedarfsgerecht, sicher und nachhaltig“ stehen. Mobilität ist ein zentrales gesellschaftliches Bedürfnis und unverzichtbar für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung. BWG-Vizepräsident Professor Harald Budelmann ist es gelungen, ein attraktives Programm zusammenzustellen. Am 8. Februar, in gut einer Woche, wird Dr. Friederike Hendriks im Rahmen dieser Akademievorlesungen einen Vortrag über Vertrauen in Wissenschaft als Grundlage für und Ziel von Wissenschaftskommunikation halten. Frau Hendriks ist stellvertretende Sprecherin der Jungen BWG; der Vortrag gehört noch zu dem vorherigen Zyklus der Akademievorlesungen.
- Am 15. und 16. Februar, in gut zwei Wochen, findet das 2. SYnENZ-Symposium über das Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz

statt. Schwerpunktthema ist, wie dieses unsere Gesellschaft doch erheblich prägende Zusammenwirken adäquat beurteilt, gemessen und bewertet werden kann. Unter der Federführung von Professor Jochen Steil, dem Sprecher der SYnENZ-Kommission, konnte auch hier ein attraktives Programm zusammengestellt werden.

Sie sind herzlich eingeladen, an diesen Veranstaltungen teilzunehmen. Lassen Sie mich noch stichwortartig wenigstens einige weitere Veranstaltungen nennen sowie Personen, die dort maßgeblich an der Organisation beteiligt sind:

- 21. April: Jahresversammlung der BWG mit Verleihung der Gaußmedaille an Professorin Maryna Viazovska; vorher findet ein Gauß-Kolloquium statt. Dank an Professor Klaus Hulek.
- 24. und 25. Mai: Landschaftsökologische Exkursion in das UNESCO-Biosphärenreservat Rhön. Dank an Professorin Annette Otte und an Professor Otto Richter.
- 21. Juni: Bioethik-Symposium zum Thema Umweltmedizin. Dank an Professor Klaus Gahl und an Professorin Christel Müller-Goymann.
- 22. Juli: Geologische Harzexkursion zum Thema: Devonische Rifffkomplexe. Dank an Professor Joachim Reitner.

Auch wenn ich hier noch viele weitere BWG-Veranstaltungen nennen könnte und mich vor allem bei zahlreichen anderen Personen bedanken müsste, tue ich dies aus Zeitgründen nicht und verweise auf die BWG-Webseiten.

Zum Thema *erhalten und erneuern*: Auch hier hatte die Pandemie negative Auswirkungen. Dennoch sind die meisten Veranstaltungen weiterhin gut besucht. Die Suche um wichtige Themen, renommierte Vortragende und adäquate Formate bleibt eine ständige Aufgabe, bei der sich dankenswerterweise – Sie werden es an der Nennung einiger Beteiligter gemerkt haben – zahlreiche BWG-Mitglieder engagieren.

2.1.3 Die fächerübergreifenden Arbeiten zu wichtigen Themen

Die fächerübergreifenden Arbeiten zu wichtigen gesellschaftlichen Themen geschehen vor allem in Kommissionen und Querschnittsbereichen, in denen BWG-Mitglieder gemeinsam mit anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern arbeiten. Beispielfhaft wurde die SYnENZ-Kommission genannt.

Auch hier wird *erhalten und erneuern* ein wichtiges Thema in den nächsten Jahren sein. Wie kann das große wissenschaftliche Potential der BWG noch weiter genutzt werden? Welche anderen Themen und Formate sollten noch dazukommen?

Lassen Sie mich eine Idee nennen. In vielen Fällen prägen technische Innovationen gesellschaftliche Entwicklungen. Sollten wir im Rahmen langfristiger, evtl. über mehrere Jahrzehnte gehender Vorhaben einige Entwicklungen, die gesellschaftlich besonders bedeutend sind, begleiten, untersuchen und Empfehlungen dazu abgeben?

Zur Charakterisierung von Technik: Dazu möchte aus einer vor fast 80 Jahren gehaltenen Rede des Philosophen Karl Jaspers zitieren. Die Sprache ist für uns heute etwas ungewohnt. Meine Bitte ist, sich auf die Inhalte zu konzentrieren.

„Die Technik dient der Daseinsgestaltung in der Beherrschung der Naturkräfte mit der Aufgabe, eine von Not entlastende und Schönheit ermöglichende Gestaltung der Umwelt des Menschen zu finden.“ Sie [eigentlich: „Die technische Fakultät“] „lebt in der Spannung zwischen technischen Möglichkeiten und menschlichen Lebensordnungen. Sie ist in einer Wertneutralität ebenso gut zur Zerstörung wie zum Aufbau zu nutzen. Sie ist an die Naturwissenschaften gebunden, aber in ihrer Verwirklichung zu führen von der Freiheit des Menschen, der weiß, was er kann und will, oder es nicht weiß.“ ([3]).

Erinnern Sie sich noch an die Präambel in der BWG-Satzung? Das integrative Zusammenwirken der Technikwissenschaften sowohl mit den Naturwissenschaften und der Mathematik als auch mit den Geistes- und Sozialwissenschaften ermöglicht die Transformation von akademischem zu beraterorientiertem Wissen.

Gerne würde ich mit Ihnen über diese Idee diskutieren. Und möglicherweise haben Sie auch weitere Ideen? Vielleicht lohnt es sich, hierzu eine Diskussionsrunde zur Zukunft und zu Chancen der BWG einzurichten.

2.2 Kooperation und Austausch mit anderen Institutionen

Nun, kurz, zur zweiten Aufgabe: Kooperation und Austausch mit anderen Institutionen. Auch in den nächsten Jahren gilt es, die Kooperation mit anderen Akademien, dort besonders mit Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, mit wissenschaftlichen Einrichtungen sowie den Austausch mit Institutionen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zu pflegen. Wie können wir uns adäquat in die Forschungslandschaft einbringen, besonders hier in Niedersachsen und in der forschungintensiven Metropolregion?

Selbstergänzung und interne Organisation

Und, ebenfalls kurz, zur dritten Aufgabe: Selbstergänzung und interne Organisation. Die BWG ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts in der Trägerschaft des Landes Niedersachsen, die es, wie alle Körperschaften, adäquat intern zu organisieren gilt. Sie verfügt in der Tradition der Wissenschaftsakademien über das wichtige Privileg des Selbstergänzungsrechts. Die Berufung neuer Mitglieder erfolgt durch die ordentlichen Mitglieder der BWG über Zuwahlverfahren. Zum Thema *erhalten und erneuern* wird sich auch weiterhin die Frage stellen, wie es uns gelingt, Kolleginnen und Kollegen in die BWG zu berufen, die besonders ausgewiesen sind, die das Fächerspektrum der BWG gut ergänzen und die sich für die Ziele der BWG engagieren werden.

3 Zum Schluss

Zum Schluss möchte ich nicht versäumen mich zu bedanken. Schon bei der Vorbereitung auf dieses Amt erhielt ich viel Rat und Unterstützung: Durch die Mitglieder der Findungskommission, durch die Vizepräsidenten und Klassenvorsitzenden und nicht zuletzt durch die fünf Vorgänger im Präsidentenamt, mit denen allen ich ausführliche Gespräche führen konnte.

Zum Thema Gespräche: Viele Gespräche stehen auch noch aus. Gerne will ich auf Sie zukommen. Umgekehrt bitte ich auch Sie, mich anzusprechen. Dieser Austausch ist mir wichtig.

Bedanken möchte ich mich auch bei Jeannette Rotermund und Nezahat Mumcu von der Geschäftsstelle der BWG sowie bei Derya Karatas, die Frau Mumcu während der Zeit ihres Mutterschutzes vertreten hat. Ihre Arbeit war für mich – und bei weitem nicht nur für mich – eine sehr große Hilfe.

Nun müsste ich auch hier wieder viele weitere Personen nennen. Das ist mir, allein aus Zeitgründen, nicht möglich. Doch gibt es eine Person, die genannt werden muss: meine Frau Katharina. Sie hat meine Entscheidung, für das Amt des Präsidenten der BWG zu kandidieren, mitgetragen; eine Entscheidung, die absehbar unsere vorherige gemeinsame Lebensplanung ziemlich durcheinanderbringen würde.

Im neuen Jahr 2023 ist nun schon wieder bald ein Monat vergangen. Die aktuelle globale Entwicklung wird vielen von Ihnen, nicht nur mir, große Sorgen machen. So viele Menschen müssen völlig unnötig leiden oder sterben. Die uns wichtigen Werte freiheitlicher Gesellschaften und die vielen von uns wichtige globale wissenschaftliche Zusammenarbeit, die beide so selbstverständlich erschienen, sind

bedroht. Auf der anderen Seite erlebe vermutlich nicht nur ich so viele positive Momente, sei es im privaten oder im fachlichen Umfeld.

Hoffmann von Fallersleben hat in seinem Gedicht *Das alte Jahr vergangen ist, das neue Jahr beginnt* aus dem Jahr 1841 – einer ebenfalls schwierigen Zeit – geschrieben:

„Ja, keine Zeit war jemals schlecht: in jeder lebet fort
Gefühl für Wahrheit, Ehr und Recht und für ein freies Wort.
Hinweg mit allem Weh und Ach! Hinweg mit allem Leid!
Wir selbst sind Glück und Ungemach; wir selber sind die Zeit.“ ([4]).

In diesem Sinne möchte ich Ihnen ein gutes neues Jahr 2023 wünschen, besonders Gesundheit, Zufriedenheit, Zuversicht und Schaffenskraft. Es ist für mich eine große Ehre, zum Präsidenten der BWG gewählt worden zu sein. Und es ist eine Aufgabe, für die ich mich, wie meine Vorgänger, intensiv engagieren möchte. Bitte tragen auch Sie, soweit es Ihnen möglich ist, mit Ihrem Engagement dazu bei, dass wir die für die Gesellschaft meines Erachtens wichtigen Ziele der BWG möglichst gut erreichen können! Lassen Sie uns gemeinsam die Flamme weitergeben!

4 Literatur

- [1] Aus https://de.wikipedia.org/wiki/Tradition#Tradition_im_Sinne_eines_kulturellen_Erbes. Offensichtlich scheint es einer der Aphorismen zu sein, die als bedeutend erachtet und weitergegeben werden, für die es aber keine wirkliche Quelle gibt. Der Verfasser hat ihn zum ersten Mal auf einer Klausurtagung der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) am 7.02.2013 von dem damaligen MHH-Präsidenten Prof. Bitter-Suermann gehört.
- [2] Satzung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. <http://www.bwg-nds.de/über-die-bwg/satzung-und-geschäftsordnungen/>.
- [3] Karl Jaspers. *Vom lebendigen Geist der Universität*. Heidelberg: Lambert Schneider; 1946. Auch enthalten in: Oliver Immel (Hrsg.). *Karl Jaspers. Schriften zur Universitätsidee. Karl Jaspers Gesamtausgabe, Band 1*. Basel: Schwabe; 2016. Der zitierte Text steht dort auf S. 87.
- [4] Hoffmann von Fallersleben. *Das alte Jahr vergangen ist (Neujahrslied)*. <https://www.volksliederarchiv.de/das-alte-jahr-vergangen-ist-neujahrslied/>.

PLENARVERSAMMLUNGEN
der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Das Eigene und das Fremde Revisited

ULRICH MENZEL

p.u.menzel@t-online.de

Vor gut 25 Jahren habe ich einen Essay verfasst mit dem Titel „Das Eigene und das Fremde“. Er wurde nicht publiziert, sondern ist in mein Archiv in die Abteilung „unveröffentlichte Manuskripte“ gewandert. Aus gegebenem Anlass habe ich ihn wieder hervorgeholt und festgestellt, dass vieles darin zwar noch aktuell ist, manches aber der radikalen Revision bedarf. Deshalb habe ich den Titel umbenannt in „Das Eigene und das Fremde Revisited“ in Anspielung an das berühmteste aller Bob Dylan-Alben.¹ Anlass meines Essays waren die vermeintlich so radikalen Umbrüche der Jahre 1989/90, Anlass der Revisited-Version sind die aktuellen Umbrüche, die viel tiefgreifender sind, als das, was wir damals mit dem Fall der Berliner Mauer wahrgenommen haben. Das irrlichternde Trump-Phänomen war nur eines der Auslöser, nicht aber die Ursache, warum weltweit eine neue Debatte geführt wird über die Frage, was gemeint ist, wenn man von dem Eigenen und dem Fremden spricht. Die korrespondierenden Begriffe im Englischen lauten „Them“ and „US“, wobei letzteres in Kapitälchen zugleich das Akronym für United States ist.²

Grenzziehungen zur Definition des Eigenen und des Fremden, zur Bildung lokaler, regionaler, nationaler oder auch Nationalstaaten übergreifender geopolitischer Identitäten durch die Bildung von Wertegemeinschaften, politischen Unionen, Wirtschaftsgemeinschaften oder Sicherheitspartnerschaften sind zugleich immer Ausgrenzungen gegenüber denen, die nicht dazu gehören bzw. nicht dazu gehören sollen, sind immer Konstrukte,³ da ihr jeweiliger Verlauf und ihre Reichweite entsprechend dem gegebenen Anlass variabel sind. Neue Welt gegen Alte Welt, Asien gegen Europa, Islam gegen Christentum, Sunniten gegen Schiiten, Islamischer Staat gegen Taliban, Protestanten gegen Katholiken, Lutheraner gegen Calvinisten, Osteuropa gegen Westeuropa, Deutschland

¹ Bob Dylan, Highway 61 Revisited. CBS 1967. In der Rangliste „Die 500 besten Alben aller Zeiten“ steht es unverständlichlicherweise nur auf Platz 4. Vgl. www.discogs.com/de/list/Die-besten-Alben-aller-Zeiten/164571. Dylan zitiert mit dem Titel möglicherweise den Roman von Evelyn Waugh, *Brideshead Revisited* von 1945.

² Vgl. dazu Rob Kroes, *Them & US: Questions of Citizenship in a Globalising World*. Urbana 2000; ferner den gleichnamigen Song von Bad Religion.

³ Vgl. dazu grundlegend Benedict Anderson, *Die Erfindung der Nation. Zur Karriere eines folgenreichen Konzepts*. Frankfurt 1988 (engl. 1983).

gegen Frankreich, Bayern gegen Preußen, Hannover gegen Braunschweig,⁴ Volkmarode gegen Hondelage.

Die älteste dieser Grenzziehungen mit der größten Reichweite, soweit die damals bekannte Welt als Ganze ins Blickfeld genommen wurde, war die zwischen Asien und Europa, zwischen Morgenland und Abendland, zwischen Orient und Okzident. Sie geht zurück bis auf die Antike, als Aristoteles den Gegensatz zwischen der Demokratie der griechischen Polis und der Despotie des persischen Königs herausstellte. Die Kriege zwischen den Griechen und Persern und später den Römern und Parthern waren der militärische Ausdruck dieser Grenzziehung.

Seit der europäischen Aufklärung wurde dieser Gegensatz intellektuell festgeschrieben – etwa bei Montesquieu in den „Persischen Briefen“, die zwei fiktive Perser anlässlich ihres Paris-Aufenthaltes in die Heimat senden und darin in einer Mischung aus Staunen, Verständnislosigkeit, Spott und Missbilligung die kulturellen und politischen Verhältnisse des zeitgenössischen Frankreichs schildern. Dieses zentrale Werk der Aufklärung wurde gleichsam über die Bande gespielt. Obwohl es den Kulturrelativismus propagierte, konnte es nur anonym in Amsterdam erscheinen und wurde in Frankreich verboten. In diese Reihe gehört auch Hegel mit seiner Philosophie der Geschichte, in der die stagnierende orientalische Welt der fortschreitenden griechischen, römischen und germanischen Welt gegenübergestellt wird, oder die von Marx popularisierte „Asiatische Produktionsweise“, die nur bürokratische Systeme und Stagnation hervorbringe, sich aber nicht in den fortschrittsfördernden Kapitalismus transformiere wie der europäische Feudalismus.

Einflussreicher als Marx' Schriften über Indien, China und Russland waren Webers religionssoziologische Studien über die Ethik der Hochreligionen, in denen er die den Geist des Kapitalismus fördernde Protestantische Ethik, der die Entwicklung blockierenden mystischen Weltflucht von Hinduismus und Buddhismus oder dem die fatalistische Schickung in die Welt fordernden Islam gegenüberstellte.

In der Frühphase des Ost-West-Konflikts diente Wittfogels Studie über die „Orientalische Despotie“ auf der Grundlage von hydraulischen Gesellschaften zur Erklärung von Maoismus in China und Stalinismus im „halbasiatischen“ Russland, das durch die Mongolenherrschaft von Renaissance und Aufklärung abgeschnitten worden sei. Selbst Barington Moores komparative Studie über die sozialen Ursprünge von Diktatur und Demokratie, die er an der Frage festmacht, welche Rolle Grundbesitzer und Bauern im Westen und im Osten bei der Entstehung der

⁴ Brage bei der Wieden, Über regionale Identität im Allgemeinen und die braunschweigische im Speziellen. In: Braunschweigisches Jahrbuch für Landesgeschichte 102.2021. S. 11-21; darauf aufbauend Uwe Day, Regionale Identität(en), Narrative und das symbolisch wertschöpfende Verhältnis von Braunschweig und „Peine West“. In: Braunschweigisches Jahrbuch für Landesgeschichte 103.2022. S. 11-46.

modernen Welt gespielt haben, gehört in diese Reihe. Die amerikanische Modernisierungstheorie und ihre Zwillingschwester, die „Comparative Politics“, wurden in den 1950er-/60er-Jahren zur theoretischen Folie eines ganz neuen Politikfeldes, der Entwicklungshilfe. Hier die modernen westlichen, dort die vormodernen nichtwestlichen Gesellschaften.

In all diesen Schriften wurde ein idealtypischer Gegensatz konstruiert: Auf der einen Seite der sich aufklärende, das finstere Mittelalter (The Dark Ages) verlassende, die Welt entzaubernde Okzident, in dem es gelingt, mit Hilfe von Wissenschaft und Technik, Bildung und Ausbildung alle Lebensbereiche dem Rationalitätsprinzip zu unterwerfen. Rene Descartes, Isaak Newton oder David Ricardo waren Leuchttürme auf dem Weg zur rationalen Durchdringung der Welt und der Beherrschung der Natur durch die Erkennung ihrer Gesetze. Im Verlauf eines langen Prozesses, als dessen Fixpunkte die Magna Charta, die Goldene Bulle, der Reichstag zu Worms, der Augsburger Religionsfrieden, der Westfälische Frieden, die Bill of Rights, die Declaration of Independence und die Constitution, der Ballhausschwur und die Deklaration der Menschenrechte, der Slogan „Make the World save for Democracy“ von Wilson, die „Four Freedoms“ von Roosevelt und zuletzt die Charta der Vereinten Nationen gelten, wurden im Okzident in unsortierter Reihenfolge Privateigentum, Gewaltenteilung, Föderalismus, Herrschaft des Rechts, Demokratisierung, Säkularisierung, Trennung von Kirche und Staat, Puritanismus, Emanzipation von Sklaven und Leibeigenen, Leistungs- statt Abstammungsprinzip, wachstumsfördernde Logik des Profits statt Logik der Rente, Liberalismus, Gleichberechtigung, Bekenntnisfreiheit und Menschenrechte, im weitesten Sinne eine Zivilgesellschaft etabliert und verfassungsmäßig garantiert. Dem wird der Orient gegenübergestellt, wo in allen Dimensionen das glatte Gegenteil herrsche, also Zentralismus, Bürokratismus, Klientelismus, Despotie, Einheit von Kirche und Staat, Unaufgeklärtheit, Fanatismus, Hedonismus, Traditionalismus, Renten- statt Profitorientierung und Stagnation.

Das Material für dieses Bild lieferten neben den zitierten Schriften der abendländischen Großtheoretiker die Reisebeschreibungen, Tagebücher, Autobiographien, aber auch wissenschaftliche Abhandlungen und nicht zuletzt die fiktive Literatur von Abenteuerschriftstellern, Seefahrern und Entdeckern, Kaufleuten, Missionaren, Forschungs- und Gesandtschaftsreisenden.⁵ Karl May, der nie im Orient war, haben wir alle gelesen. Der in den USA lebende Palästinenser Edward Said hat dieses Konstrukt des Orients „Orientalismus“ genannt.⁶ Die „Persischen Briefe“ waren das Gegenstück zu den „Märchen aus 1001 Nacht“. Absicht der genannten Autoren war es entweder, einen dauerhaften Kulturrelativismus und damit den Bestand der Grenzen und Gegensätze zu propagieren oder einen Universalismus, der diese Grenzen perspektivisch aufhebt.

⁵ Dazu Martin Mulsow, *Überreichweiten. Perspektiven einer globalen Ideengeschichte*. Berlin 2022.

⁶ Edward Said, *Orientalismus*. Frankfurt 1981 (engl. 1978); vgl. dazu Michael Sprinker (Hrsg.), *Edward Said: A Critical Reader*. Oxford. 1992 sowie Edward Said, *Culture and Imperialism*. New York 1993.

Geographisch wurde im Zuge von „Entdeckungsfahrten“, auch so ein distanzierender Begriff, und europäischer Welteroberung der Orient immer weiter ausgedehnt. Er erstreckte sich schließlich vom Osmanischen Reich über Persien, Indien, Indochina und die indonesische Inselwelt bis nach China und Japan, wobei ggf. auch das „halbasiatische“ Russland dem Orient zugeschlagen wurde. Während die Portugiesen, die noch pauschal von „Indien“ gesprochen hatten, aufgebrochen waren, den Seeweg nach Indien zu finden und den Estado da India zu gründen, wurde die Begrifflichkeit mit dem Aufkreuzen der Holländer und Engländer differenzierter, sprach man seitdem von Britisch Indien, Niederländisch Indien und später Indochina. Kolumbus, der den Seeweg nach Indien auf der Westroute finden wollte, glaubte Zeit seines Lebens, in Indien gelandet zu sein. Aufgrund seines Irrtums heißen die Inseln in der Karibik Westindische Inseln, die Ureinwohner Indianer. Tatsächlich hatte er in der Westlichen Hemisphäre einen neuen Kontinent „entdeckt“. Im Vertrag von Tordesillas zwischen Kastilien und Portugal wurde die Neue Welt 1494 von der Alten Welt durch eine Demarkationslinie von Pol zu Pol getrennt.

Der „Ferne Osten“ begann jenseits von Aden. Die immer noch gebräuchliche Unterscheidung zwischen dem Nahen, dem Mittleren und dem Fernen Osten, die selbst in Amerika verwendet wird, obwohl von dort aus diese Regionen im Westen liegen, unterstreicht die eurozentrische, mehr als nur geographisch gemeinte, Grenzziehung. Der Nullmeridian verlief zu Zeiten der Portugiesen durch die westlichste Kanaren-Insel Hierro und seitdem immer noch durch die Sternwarte von Greenwich bei London.

Sogar die Unterteilung der zusammenhängenden Landmasse der Östlichen Hemisphäre in die drei Erdteile Europa, Asien und Afrika ist eine solche Konstruktion, da jene nicht mit kongruenten Kulturräumen identisch sind. So erstreckt sich der Kulturraum des Islam von Marokko ganz im Westen Nordafrikas bis in den fernen Westen von China und die indonesische Inselwelt, hat als Erbe des Osmanischen Reiches Spuren auf dem Balkan und im Kaukasus hinterlassen. Umgekehrt diente ein kaum weniger idealtypisches Konstrukt des Westens seit Ende des 19. Jahrhunderts den intellektuellen Oppositionsbewegungen in orientalischen Ländern zur programmatischen Folie ihrer Modernisierungsbestrebungen. Diese gab es nicht nur in Russland unter dem Begriff „Westler“ bzw. Okzidentalisten⁷, sondern gleichermaßen auch in der Türkei, in Ägypten, China, Indien, Japan u. a. asiatischen Ländern. Selbst die Eliten der afrikanischen Befreiungsbewegungen der 1950er-/60er-Jahre bezogen sich noch auf ein Gedankengut, das sie während des Studiums in Paris oder London erfahren hatten.

⁷ Vgl. dazu aus der kritischen Gegenposition Ian Buruma/Avishai Margalit, *Okzidentalismus: Der Westen in den Augen seiner Feinde*. München 2005.

Auch die Grenze zwischen Europa und Asien ist ein Konstrukt, ist Europa im geographischen Sinne doch kein eigener Kontinent, sondern nur der westliche Appendix der eurasischen Landmasse. Zwischen 1570 (Abraham Ortelius) und 1963 (Müller-Wille) lassen sich 13 von Geographen gezeichnete Grenzen zwischen Europa und Asien identifizieren. Am prominentesten ist die von Strahlenberg (1730), die auf der Suche nach einer vermeintlich natürlichen Grenze den Ural bestimmte, obwohl die Birkenwälder hinter dem Ural genauso aussehen wie vor dem Ural. Ein delikates Problem liegt im Südosten, wo es keinen Ural gibt. Manche Geographen bestimmen deshalb die Wasserscheide im Kaukasus als Grenze. Demnach liegt das christliche Georgien in Asien, das muslimische Tschetschenien in Europa. Die am weitesten im Westen liegende Grenze zog Ewald Banse (1912). Sie verläuft von St. Petersburg bis zur Mündung der Donau ins Schwarze Meer, schließt gerade noch die baltischen Staaten ein, definiert aber bereits Weißrussland und die Ukraine aus Europa heraus. Die eigentliche Logik der Grenzziehungen entsprach den Interessen des jeweiligen Auftraggebers. Der russische Zar wollte eine Grenze weit im Osten, um möglichst viel von Russland nach Europa zu verlagern, ein westeuropäischer Machthaber eine Grenze möglichst weit im Westen, um Russland heraus zu definieren. Wir nähern uns der Gegenwart.

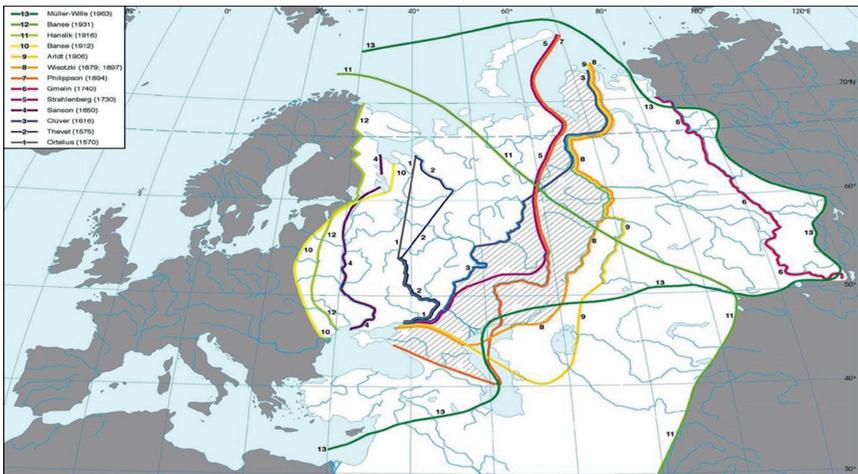


Abb. 1. Die Ostgrenzen Europas.

Quelle: Hartwig Hummel, *Die Grenzen Europas*. In: *Jahrbuch der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf* 2004, S. 273-289.

Auch innerhalb Europas führen alte Grenzen ein zähes Leben – etwa die Grenze zwischen West- und Ostrom bzw. der Römisch-Katholischen und der Griechisch-Orthodoxen Kirche, die Grenze zwischen dem Habsburger Reich und dem Osmanischen Reich auf dem Balkan oder die Grenzen des Reichs Karls des Großen, das in etwa identisch ist mit dem, was man heute unter „Kerneuropa“ versteht.

Seit dem Zweiten Weltkrieg lieferte die Geographie erneut die Begrifflichkeit für großräumige Grenzziehungen, wenn auch die Verwendung der Begriffe Westen und Osten nicht mehr der alten von Okzident und Orient entsprach. Gemeint waren im engeren Sinne die Verteidigungsgemeinschaften des Westens und des Ostens mit ihrem organisatorischen Ausdruck von NATO und Warschauer Pakt. Der Ost-West-Konflikt war sicherheitspolitisch bestimmt. Erst in zweiter Linie war er auch ein Gegensatz von Marktwirtschaft und Planwirtschaft, von Liberalismus und Sozialismus oder von Demokratie und sog. Diktatur des Proletariats. In der angeblichen „Stunde null“ im Mai 1945 wusste jeder Deutsche sofort, ob er zu den eigentlichen Verlierern oder Gewinnern des Krieges gehörte. Eine Kurzfassung der Jahre 1939–1945 in Westdeutschland lautete: „Erst kam der Krieg, dann kam der Zusammenbruch und dann kamen die Amerikaner.“ In Ostdeutschland lautete es am Ende des Dreisatzes: „und dann kam der Russe.“



Abb. 2. NATO vs. Warschauer Pakt.

Das im Westen gebräuchliche Begriffspaar „Freier Westen“ und „Ostblock“ korrespondierte im Osten mit den Begriffen „Lager des Imperialismus“ und „Weltfriedenslager“. Auf diese Weise war es möglich, auch solche Länder als dem westlichen oder östlichen „Lager“ zugehörig zu definieren, die über Militärbündnisse oder eine ordnungspolitische bzw. ideologische Grundorientierung der einen oder anderen Seite verpflichtet waren. Der „Osten“ begann an der Elbe, da wo zuvor in Preußen die Gutswirtschaft angefangen und das freie Bauerntum aufgehört hatte.

Ostelbien ist auch so ein distanzierender Begriff, der eine alte Grenze markiert, die womöglich die DDR-Zeit überlebt hat. Der „Osten“ endete am 38. Breitengrad, der Demarkationslinie zwischen Nord- und Südkorea mit isolierten Ablegern in Südostasien, der Karibik und Afrika. Umgekehrt konnten Länder des „Fernen Ostens“ wie Japan oder Taiwan, manchmal auch muslimische Länder wie der Iran zu Zeiten des Schahs zum Westen gezählt werden.

Auch die Begriffe „Norden“ und „Süden“ dienten einer solchen Grenzziehung.⁸ Der „Norden“, das waren die modernen Industriegesellschaften der OECD, am einfachsten mess- und damit abgrenzbar über ein Mindest-Pro-Kopf-Einkommen oder andere quantifizierbare Indikatoren wie Alphabetisierungsrate oder durchschnittliche Lebenserwartung. Der „Süden“, das waren die vormodernen Agrargesellschaften in Asien, Afrika und Lateinamerika, die bestimmte Ausprägungen dieser Indikatoren nicht erreichten. Die jährlichen Ranglisten des seit 1978 erscheinenden Weltentwicklungsberichts der Weltbank mit ihren Gruppierungen sind ein schönes Beispiel für eine statistische Art der Grenzziehung, wobei die Weltbank immer neue Akronyme kreierte, den Süden begrifflich zu differenzieren. Zum Norden konnten so ohne weiteres Australien, Neuseeland und ggf. auch Südafrika zur Zeit der Apartheid gehören, obwohl alle auf der südlichen Halbkugel gelegen, nicht aber die europäischen Siedlerkolonien Argentinien, Chile und Uruguay, während Mexiko oder das NATO-Land Türkei zum Süden gezählt wurden, auch wenn beide auf der nördlichen Halbkugel liegen.

Der französische Demograph Alfred Sauvy hat 1952 den Begriff „Tiers Monde“ und den Begriff „Tiers Mondisme“ im Sinne von Dritte Welt-Bewegung geprägt.⁹ Der Begriff war emanzipatorisch gemeint, da an den „Dritten Stand“ der Französischen Revolution erinnernd. Er war ein strukturalistisches Konstrukt der Nachkriegsordnung, indem er unterstellte, dass die Länder Asiens, Afrikas und Lateinamerikas strukturelle Gemeinsamkeiten aufweisen und wie der Dritte Stand auch zu gemeinsamem Handeln zur Durchsetzung ihrer Interessen gegen die Erste und Zweite Welt fähig seien. Die im indonesischen Bandung 1955 gegründete Blockfreien-Bewegung unter Teilnahme Chinas, das schon damals nicht zum Ostblock unter sowjetischer Führung gehören wollte, war der politische Ausdruck dieses Denkens. Später hat der Begriff eine Umdeutung im Sinne von arm, rückständig, unterentwickelt, sogar eine abwertende Konnotation im Sinne von „drittklassig“ erhalten. Seit einiger Zeit wird er durch den angeblich politisch korrekteren Begriff „globaler Süden“ ersetzt, um die abwertende Konnotation der Reihung zu vermeiden. Sie scheint aber immer noch durch, wenn man den globalen Süden dem globalen Norden gegenüberstellt. Was bei Sauvy positiv besetzt war, hatte sich in sein Gegenteil verwandelt.

⁸ Blaut, J.M., *The Colonizers Model of the World: Geographical Diffusionism and Eurocentric History*. New York 1993.

⁹ Alfred Sauvy, *Trois mondes, une planète*. In: *L'Observateur* Nr. 118, 1952, S. 14; ferner ders., *Le „Tiersmonde“*. *Sous-développement et développement*. Paris 1961.



Abb. 3. Teilnehmerstaaten der Konferenz von Bandung 1955

Quelle: <http://payer.de/thailandchronik/thai00593.jpg>.

Der harte Kern des Westens war jedenfalls seit Anfang der 1950er-Jahre die Schnittmenge aus der Sicherheitsgemeinschaft der NATO, der Industriegemeinschaft der OECD, der Wertegemeinschaft der durch die Aufklärung geprägten Länder und der Glaubensgemeinschaft des Christentums, bestehend aus den Ländern beiderseits des Nordatlantiks. „Atlantizismus“ lautete der unkorrekte politische Begriff, lagen doch Brasilien und Angola auch beiderseits des Atlantiks, nur dass diese keine britischen wie im Norden, sondern portugiesische Kolonien wie im Süden gewesen waren. Also spielte auch die Identität der früheren Kolonialmacht eine Rolle bei der Semantik des Begriffs. Je nach Problemlage konnten dennoch neutrale Staaten wie die Schweiz, Schweden, Österreich und Finnland, ferner Israel, Japan, Südkorea, Südvietnam, Taiwan, Hongkong, Australien, Südafrika oder die Türkei, selbst arabische Feudalstaaten wie Saudi-Arabien dem Westen zugeschlagen werden. Dieser ging dann in der weiter gefassten begrifflichen Entität der „freien Welt“ auf. Dass gerade die Ölstaaten am Persischen Golf weit entfernt waren von dem, was man im Westen unter Freiheit verstand, wurde geflissentlich ausgeblendet.

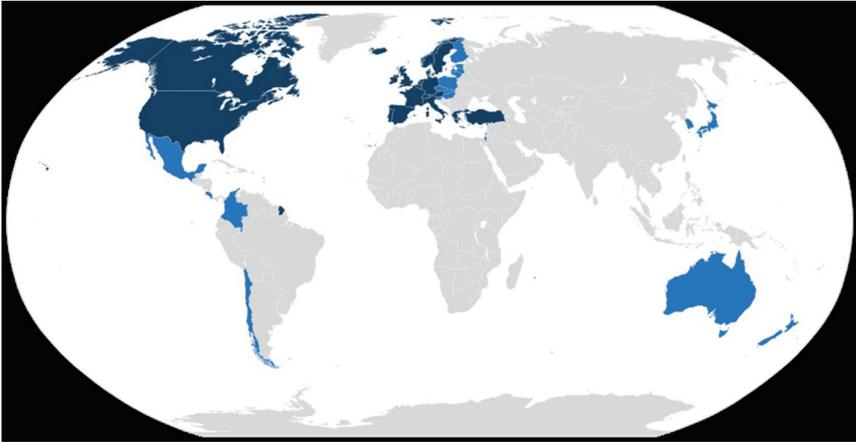


Abb. 4: Mitgliedsstaaten der OECD.

Geopolitische Identitäten stehen aber, so das poststrukturalistische Argument, nicht für alle Zeiten fest, sondern bedürfen der dauernden Rekonstruktion bzw. Dekonstruktion im Sinne der Anpassung an neue Gegebenheiten. Sie müssen immer wieder durch intellektuelle Anstrengungen, durch politische Praxis und die darum geführte Auseinandersetzung im Bewusstsein der Menschen verankert, müssen hegemonial im Sinne Gramscis werden. Genau diese Situation schien nach 1990 wie nach 1945 gegeben, weil die vertraute Identität des Westens brüchig geworden war. Dafür habe ich in der Urfassung des Manuskripts fünf Ursachen genannt:

1. Der Zusammenbruch des Sozialismus, die Auflösung der Sowjetunion und der Untergang des sowjetischen Imperiums hatten nicht nur das alte sicherheitspolitische Verständnis von Westen und Osten erschüttert, sondern auch neue bzw. ganz alte Grundsatzfragen aufgeworfen, weil das ordnungspolitische und das ideologische Gegenstück des Westens weggebrochen war. Bedeutete die doppelte Transformation der ehemaligen Länder des „Ostblocks“ in Richtung Marktwirtschaft und Demokratie, zwischenzeitlich sogar Transformationsgesellschaften genannt¹⁰, dass damit auch die anderen Facetten des Ost-West-Gegensatzes aufgehoben waren, dass diese Länder seitdem gar in toto zum Westen gehörten? Reichte damit der Westen im Osten bis zum Ural oder gar bis Wladiwostok und im Süden bis zum Kaukasus? Wenn man berücksichtigt, wer mittlerweile alles beim European Song Contest der Eurovision oder bei der Fußballmeisterschaft der UEFA mitsingen oder mitspielen darf, dann

¹⁰ Guillermo O'Donnell/Philippe Schmitter/Laurence Whitehead (Hrsg.), *Transitions from Authoritarian Rule: Prospects for Democracy*. Baltimore 1986.

scheint einiges für diese These zu sprechen. Sollten bzw. durften demnach alle die Länder zum Westen gehören, die wollten oder nur diejenigen, die in diesem Transformationsprozess erfolgreich waren?

Wenn Letzteres galt, worin maß sich der Erfolg? Die Kopenhagener Beitrittskriterien, die erfüllt sein müssen, wenn ein Land Mitglied der EU werden will, sind ein wirkungsmächtiges Beispiel für dieses Denken. Die nicht enden wollenden Beitrittsverhandlungen der Türkei gehen auf die Nichterfüllung dieser Kriterien zurück. Wie groß der Ermessensspielraum ist, zeigte sich bei dem Beitritt von Bulgarien und Rumänien, die die wirtschaftlichen Kriterien viel weniger erfüllten als die Türkei. Die Schweiz hätte, wenn sie nur wollte, im Handumdrehen Mitglied der EU werden können. Oder trat nach 1990 an die Stelle sicherheits- und ordnungspolitischer Kriterien wieder die alte Vorstellung einer christlich-weströmischen Kultur- und Wertegemeinschaft, die die orthodoxen Nachfolgestaaten Konstantinopels bzw. von Byzanz ausschließt? Wurde womöglich das erste Kirchenschema auf dem Konzil von Nicaea aus dem Jahre 325 wieder aktuell? Hätte man aus dieser Logik nicht Griechenland und Zypern aus der Gemeinschaft des Westens heraus definieren müssen? Aber auch das Erbe des europäischen Teils des Osmanischen Reiches, das in Bosnien, in Albanien, in Makedonien fortlebt, meldete sich zurück und ließ sich zur Grenzziehung nutzen. Jugoslawien war nur der grandios gescheiterte Versuch, die alten Grenzen auf dem Westbalkan zu überwinden. Oder war das Abgrenzungskriterium zwischen Ost und West in Europa gar ein ethnisches, nämlich der lateinischen und germanischen Länder im Westen gegenüber den slawischen im Osten?

2. Der Industrialisierungsprozess in Ost- und Südostasien, der aus den früheren „Ländern der Dritten Welt“ Schwellenländer gemacht hatte, die wiederum in solche der ersten, zweiten und dritten Generation unterteilt wurden. Nach den vier Tigerstaaten Südkorea, Taiwan, Hongkong und Singapur wurden die meisten ASEAN-Länder dazu gezählt. Solange sich die asiatische OECD-Mitgliedschaft auf Japan beschränkt hatte, war das Land, zumal es in enger Sicherheitspartnerschaft mit den USA verbunden war, ohne Umschweife als eine Art Ehrenmitglied dem Westen zugeschlagen worden, hatte es sich doch durch seine bereitwillige Imitation westlicher Institutionen und Adaption westlicher Technik seit der Meiji-Restauration als gelehriger Schüler erwiesen. Die „Verwestlichung“ der kemalistischen Türkei oder Russlands seit Peter dem Großen, der Zar und Zimmermann sein wollte, ist demgegenüber nie so richtig als solche akzeptiert worden. Gehörten jetzt auch die Tigerstaaten, demnächst Malaysia, Thailand und Indonesien zum Westen? Und vor allem: Welchen Einfluss auf diese Frage hatte die sich beschleunigende Industrialisierung Chinas nach der Öffnung des Landes 1978? Dass es in China nach dem Peking Frühlings nicht zur Abdankung der Kommunistischen Partei, sondern zur militärisch erzwungenen Restauration ihrer Herrschaft gekommen ist, war so gesehen sogar hilfreich, weil man die Frage unbeantwortet lassen konnte. Es blieb allerdings

der Zweifel, ob Industrialisierung nicht doch mit einem autoritären System vereinbar ist, das zwar westliche Konsummuster übernimmt, aber westliche Werte explizit nicht akzeptiert.

Zumindest die Kriterien „moderne Industriegesellschaft“ und „marktwirtschaftliche Grundorientierung“ (in den meisten) und „Demokratisierung“ (in manchen) der genannten Fälle waren gegeben. Umgekehrt nahmen in Asien mit wachsendem wirtschaftlichem Erfolg auch das kulturelle Selbstbewusstsein und die Bereitschaft zu, diesen Erfolg unter Rückgriff auf traditionelle Werte wie den Konfuzianismus und gerade nicht durch „Verwestlichung“ zu erklären. Das stellte nicht nur die Weber-These auf den Kopf, sondern brachte auch die „Westler“ in den Schwellenländern in die Defensive. Stattdessen wurde versucht, eine asiatische Identität im Sinne eines „Asianismus“ zu konstruieren, die positiv besetzt ist.¹¹ Ob es diese übergreifende Identität angesichts hinduistischer, buddhistischer, muslimischer, konfuzianischer und sogar christlicher Traditionen in Asien tatsächlich gibt oder nur das kontrafaktische Gegenkonstrukt zur Identität des Westens ist, blieb eine offene Frage. Wenn aber alle diese Länder nicht zum Westen gehören sollen oder wollen, müsste dann nicht auch die japanische Mitgliedschaft in Frage gestellt werden?

3. Die demographische Entwicklung in vielen Ländern, die zum eigentlichen Kern des alten Westens gehörten, hatte Anlass zur These gegeben von der sich abzeichnenden „Versüdlichung“ des Nordens und damit der „Dekonstruktion“ des Westens im Faktischen. Aufgrund von Migration und unterschiedlichem generativen Verhalten der zugewanderten nichtweißen Ethnien wurde für die USA prognostiziert, dass dort im Jahre 2050 die Latinos, Asiaten und Afroamerikaner zusammen einen größeren Anteil an der Bevölkerung als die Abkömmlinge europäischer Einwanderer stellen. Würden dann die USA, insbesondere deren südliche und westliche Bundesstaaten, noch zum Westen gehören? Ähnliche Überlegungen gab es in Australien hinsichtlich der asiatischen Einwanderung. In Europa wurde diese Debatte in Frankreich mit seiner nordafrikanischen Einwanderung angeführt, die Autoren wie Gilles Kepel von Frankreich als der „Banlieue des Islam“ sprechen ließen.¹² In Deutschland riefen die türkischen, in Großbritannien die indischen und pakistanischen, in den Niederlanden die Einwanderer aus Surinam und den Molukken, in Italien die albanischen und rumänischen Einwanderer ähnliche Reaktionen hervor. Der Migrationsdiskurs trug jedenfalls zu neuen Grenzziehungen innerhalb des Westens bei, die manchmal quer durch die großen Städte verliefen und sich auch im Straßenbild wiederfinden lassen, sobald die angestammten Bewohner die von Migranten bewohnten verließen.

¹¹ Vgl. dazu u. a. Lucian W. Pye, *Asian Power and Politics: The Cultural Dimensions of Authority*. Cambridge, Mass. 1985.

¹² Gilles Kepel, *Les banlieues de l'Islam*. Paris 1991.

4. Die Refundamentalisierung in etlichen islamischen Ländern, die auch vormals explizit laizistische Staaten wie die Türkei, Ägypten oder Algerien erfasste hatte, ließ auch die Südgrenze des Westens in Europa plastischer werden. Das Mittelmeer, das nicht nur während des Römischen Reiches, sondern auch noch zu Zeiten der italienischen Fernhandelsstädte Genua, Pisa und Venedig ein integrierter Raum war, in Shakespeares „Kaufmann von Venedig“ sogar literarisch verarbeitet, wurde zur Grenze. Die Türkei, als NATO- und OECD-Mitglied eigentlich dazu prädestiniert, zum alten Westen zu gehören, stieß auf anschwellende Ablehnung ihres Beitrittsgesuchs zur EU bis tief in bürgerliche Kreise. Würde umgekehrt die Türkei künftig selber noch zum Westen gehören wollen, wenn sie alte Bindungen in Richtung Kaukasus und zu den Turkvölkern Zentralasiens, die aus dem sowjetischen Imperium ausgeschieden waren und sich auf ihre vorsowjetischen Wurzeln besannen, wiederbelebt? Die Aufnahme von Slowenien und Kroatien, bis 1918 zum Habsburger Reich gehörend, in EU und NATO war 1997 wahrscheinlich, diejenige von Bosnien oder Albanien, einstmals zum Osmanischen Reich gehörend, kaum denkbar. Die wenige Jahre zuvor noch in Frankreich und Italien diskutierte Perspektive einer wirtschaftlichen Integration der Mittelmeeranrainernstaaten verfinsterte sich.

5. Und schließlich schien auch eine Auflösung des atlantischen Kerns des Westens denkbar. Die europäische Integration, die schon lange über eine bloße Wirtschaftsgemeinschaft hinausging, wurde in dem Maße, wie sie politische und militärische Formen annahm, auch von einem neuen Diskurs über europäische Identität begleitet, der zur Verabschiedung einer Verfassung der Vereinigten Staaten von Europa unweigerlich dazugehörte. Dass der Verfassungskonvent gescheitert ist, war ein Vorbote, dass hier womöglich eine Grenze der Integration erreicht war. Umgekehrt fand die wirtschaftliche Orientierung der USA nach Lateinamerika und Asien ihren organisatorischen Ausdruck in Gebilden wie der NAFTA (unter Einschluss Mexikos) und der APEC, die nicht nur dem demographischen Wandel in den USA Rechnung trugen, sondern auch von Diskussionen um eine „pazifische Identität“ begleitet wurden. In den 1990er-Jahren konnte man zumindest spekulieren, dass diese Tendenzen und Überlegungen zur Reduzierung des alten Westens auf die EU oder gar ein noch enger gefasstes „Kerneuropa“, damals ein populärer, aber umstrittener Begriff, führen würde, während sein nordamerikanischer Teil in der Identität einer Westlichen Hemisphäre oder eines Pazifischen Beckens aufging.

Alle diese Fragen machen deutlich, dass in den 1990er-Jahren eine Debatte über eine Definition dessen, was unter dem „Westen“ zu verstehen ist, auf der Tagesordnung stand.¹³ Dabei ging es um eine neue Identitätsstiftung und deren Be-

¹³ Vgl. dazu Hartwig Hummel, *Der neue Westen. Der Handelskonflikt zwischen den USA und Japan und die Integration der westlichen Gemeinschaft*. Münster 2000.

gründung, weil die daraus resultierende neue Konstruktion des Westens benötigt wurde, um einen normativen Maßstab für politische Entscheidungen zu gewinnen, selbst wenn dieser Maßstab nicht immer explizit gemacht wird, sich vielmehr hinter diversen Sachzwängen oder realpolitischen Erwägungen verbirgt. Solche Fragen waren die Zugehörigkeit zu Militärbündnissen (NATO), zu politischen (EU) oder wirtschaftlichen (NAFTA, APEC, ASEM) Gemeinschaften oder die Einräumung von Präferenzen für einzelne Länder, waren Assoziationsabkommen, die Bereitschaft, Finanzhilfen zu gewähren oder Entscheidungen, ob, wann, wie, wo und vor allem wie legitimiert eine politische oder militärische Intervention in Krisengebieten stattfinden sollte. Insbesondere die Konstruktion des Begriffs „Humanitäre Intervention“ und die daraus resultierende „Responsibility to Protect“ (R2P), nämlich der Schutz als neue völkerrechtliche Norm, hat jahrelang die Debatte in der UNO bestimmt.¹⁴ Beeinflusst durch implizite normative Grundsätze wurden aber auch eher innenpolitische Fragen wie die der doppelten Staatsbürgerschaft, des Einwanderungsrechts, des Asylrechts, der Arbeitserlaubnis für Ausländer oder der Mitgliedschaft im Schengenraum. Selbst die vielen Facetten der Debatte um politisch korrekte Begriffe gehört noch in diesen Kontext. In der Tendenz konnten sich in den 1990er-Jahren die liberalen Positionen durchsetzen.

Eine Sichtung der damals aktuellen Literatur zeigt, dass sich die Diskussion zwischen den Polen Fukuyama und Huntington, zwischen Universalismus und Kulturrelativismus wie zu Zeiten der Aufklärung, zwischen Ausweitung und neuer Eingrenzung des Westens bewegte.¹⁵ Fukuyama verband mit seiner von Hegels Geschichtsphilosophie inspirierten These vom Ende der Geschichte die Annahme, dass nach dem Zusammenbruch des Sozialismus nicht nur Marktwirtschaft und Demokratie, sondern auch das westliche rationale Denken ebenso wie universalistische Prinzipien der Menschenrechte sich ausbreiten würden, mithin die ganze Welt schrittweise verwestlicht werde. Später hat man das Globalisierung genannt. Eine populäre Version dieser These lautete, dass mit dem weltweiten Siegeszug der amerikanischen Massenkultur (Fast Food, Film, Popmusik, Mode, Sport etc.) auch eine Amerikanisierung, sprich Verwestlichung, der Welt einhergehe.

Diese Annahme wurde von Huntington mit seiner These vom „Clash of Civilisations“ scharf zurückgewiesen. Die Essenz des Westens sei nicht der Big Mac, sondern die Magna Charta, ein Wortspiel, das im Englischen noch ausdrücklicher ist. „The West Unique, not Universal“, so der Titel eines nachgeschobenen Aufsatzes.¹⁶ Wer den Big Mac konsumiert, muss nicht das Gedankengut der Magna

¹⁴ Bastian Loges, Schutz als neue Norm in den internationalen Beziehungen. Der UN-Sicherheitsrat und die Etablierung der Responsibility to Protect. Wiesbaden 2013.

¹⁵ Francis Fukuyama, *The End of History and the Last Man*. New York 1992; Samuel P. Huntington, *Der Kampf der Kulturen. The Clash of Civilisations. Die Neugestaltung der Weltpolitik im 21. Jahrhundert*. München 1996.

¹⁶ In *Foreign Affairs* Nov-Dec. 1996. S. 28-46.

Charta verinnerlichen. Modernisierung sei nicht gleichzusetzen mit Verwestlichung. So wie vormoderne Gesellschaften unterschiedlicher Kulturräume nicht gleich waren, weil sie vormodern waren, gilt das auch für moderne Gesellschaften. Insofern ist auch die Vorstellung einer asiatischen Identität, die auf asiatischen Werten beruht, ein Trugschluss. Das, was den Westen essentiell aus- und damit einzigartig macht, sei älter als die Modernisierung. Aufgezählt werden das klassische Erbe der Antike, das Christentum, die Verwandtschaft der europäischen Sprachen, die Trennung von Staat und Kirche, die auf die römische Rechtstradition zurückgehende Herrschaft des Gesetzes, repräsentative Organe auf der Basis von Verfassungen, sozialer Pluralismus, Individualismus, die Herausbildung einer Zivilgesellschaft, also alles Elemente, die sich im eingangs skizzierten despotischen Orientbild der europäischen Geistesgeschichte nicht finden lassen.

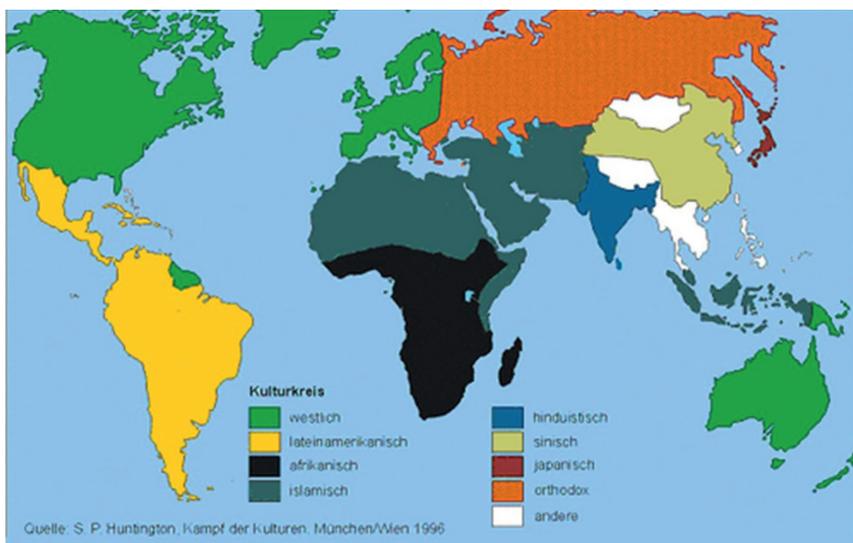


Abb. 5. Die Kulturkreise nach Huntington.

Quelle: Samuel P. Huntington: *Kampf der Kulturen*. München/Wien 1996. S. 22ff.

Insofern steht Huntington nicht in der Tradition der Modernisierungstheorie, weil sich die ganze Welt eben gerade nicht nach westlichem Muster entwickelt, sondern jedes ihrer Teile nach eigener Façon. Folglich zog er scharfe, durch Kulturräume markierte, Linien auf der Weltkarte, die in Europa den Osten, nämlich die christlich-orthodoxe Welt, und den Süden, den islamischen Teil Europas vom katholisch/protestantischen Westen trennen. In Amerika wurde eine ähnliche Linie im Süden von Nordamerika zum lateinamerikanischen Kulturraum gezogen, der aufgrund seiner Vermischung von europäischer mit indianischer und afrikanischer Kultur eine Besonderheit darstelle. Während das 19. Jahrhundert durch den Konflikt der Nationalismen und das 20. Jahrhundert durch den Konflikt der Ideo-

logien geprägt wurde, prognostizierte er für das 21. Jahrhundert den Konflikt der Kulturen. Kulturen bilden für Huntington den äußersten Rahmen, innerhalb dessen sich noch Identitätsbildung vollziehen kann. Alles was darüber hinaus geht, gehört definitiv zum Fremden. Deshalb plädierte er für eine Wiederbelebung des Atlantizismus und gegen eine pazifische Integration der USA bzw. eine Ausdehnung der NAFTA auf Lateinamerika. Dessen Kern sei die NATO, die nach Osten um die nichtorthodoxen christlichen Staaten wie Polen erweitert, gleichzeitig aber von Griechenland und der Türkei gesäubert werden müsse.

Varianten dazu lieferten die Plädoyers für eine Transatlantic Free Trade Area und eine Atlantische Union (AU), die als Dach für NATO, EU und WEU dienen sollte. Eine Osterweiterung von EU und NATO wurde ebenso vehement abgelehnt wie eine weitere Vertiefung der EU á la Maastricht, die als Spaltung des Westens und damit als eine Wiederbelebung des Gaullismus verstanden wurde. Stattdessen sollten der EU-Binnenmarkt und Nordamerika zu einem atlantischen Binnenmarkt erweitert werden, um so die Deckungsgleichheit mit der NATO herzustellen. Die AU und damit der Westen wurden auf diese Weise definiert als eine Gemeinschaft demokratischer Nationalstaaten, die gleichermaßen der Marktwirtschaft wie einer liberalen Gesellschaft verpflichtet sind. Das sei die eigentliche Logik des Westens.

Während die Wiederbelebung des Atlantizismus vor allem von amerikanischen Autoren beschworen wurde, gab es in Europa eine breite Diskussion um eine **europäische** Identität. Wie weit reicht Europa in Richtung Osten nach dem Ende des Ost-West-Konflikts? Was sind seine Wurzeln und worin besteht seine Identität unter den neuen politischen Vorzeichen? Hier wurden historische, geistesgeschichtliche und kulturelle Argumente bemüht. Institutioneller Ausdruck dieses „alten Westens“ sei die EU, deren Vertiefung zur politischen Union immer weiter vorangetrieben werden müsse, deren Erweiterung nach Osten aber nicht grenzenlos sein könne. Das war das Projekt der alten europäischen Elite, die in Brüssel den Diskurs bestimmte. Implizit stand dahinter auch eine Absage an den Atlantizismus à la Huntington, die europäische Arroganz über die kulturlosen USA und in Frankreich speziell die Abneigung gegen einen angelsächsisch dominierten Westen.

Eine extreme Gegenposition hierzu formulierte Sibylle Tönnies, Enkelin des Soziologen Ferdinand Tönnies, in dem Buch „Der westliche Universalismus“.¹⁷ Nicht Europa, sondern Amerika sei der Westen – nicht, weil es aus europäischer Perspektive im Westen liegt, sondern weil Amerika mit seiner „Manifest Destiny“ und der immer weiter vorgeschobenen „Frontier“, die längst die Küste Kaliforniens hinter sich gelassen habe, das universalistische Projekt anleite. Europäische Identität sei so gesehen nur der rückwärtsgewandte Ausdruck des Wunsches, sich gegen

¹⁷ Sibylle Tönnies, *Der westliche Universalismus*. Opladen 1995.

den amerikanischen Universalismus abzuschotten. Die in Deutschland so populäre Mitteleuropa-Diskussion, die Frage des deutschen „Sonderwegs“, eine mehr in der Romantik, bei den Gebrüder Grimm, Heinrich Heine und Robert Schumann, an den Ufern des Rheins und im deutschen Wald als im französischen oder britischen Rationalismus vermutete deutsche Identität sind nur Facetten dieser Diskussion. Bereits Europa würde demnach aus einer universalistisch-amerikanischen Perspektive in drei Konstrukte von Identität zerfallen, das „rationalistische“ Westeuropa, das „romantische“ Mitteleuropa und das „despotische“ Osteuropa.

Soweit die Debatte der 1990er-Jahre. 25 Jahre später revisited – ist das alles Ideengeschichte. Ganz andere Konstruktionen des Eigenen und des Fremden sind angesagt. @realDonaldTrump und seine Wähler, Boris Johnson und die Brexiteers, Marine Le Pen und der Front National, Giorgia Meloni und die Fratelli d'Italia, die Schwedendemokraten, die Wahren Finnen, der Flams Belang, die Freiheitlichen oder die sich immer weiter radikalisierende AFD haben ein reduziertes Verständnis von Identität, in dem der Westen, der Okzident, der Universalismus, der Atlantizismus, die EU, der Freihandel, die Freizügigkeit, das Schengener Abkommen, die Deklaration der Menschenrechte und besonders die Flüchtlingskonvention in Teilen oder ganz und gar nicht mehr vorkommen. Identität wird bei Populisten und ihren Anhängern wie im 19. Jahrhundert als eine nationale definiert, in der Einwanderungsnation USA sogar noch enger im Sinne der ersten Einwanderungsgeneration. Die city upon a hill in gods own country soll nur von denen bewohnt sein, die mit dem Akronym WASP (= white, anglo-saxon, protestant) gemeint sind.

Wenn man 25 Jahre später die fünf Punkte rekapituliert, die Anfang der 1990er-Jahre Anlass waren, geopolitische Identitäten neu zu justieren, ergeben sich die folgenden Befunde:

1. Obwohl es keine Restauration des Sozialismus nach sowjetischem Muster gegeben hat, hat der alte Ost-West-Gegensatz in Europa wieder an Kontur gewonnen. An die Stelle des Stalinismus oder Bolschewismus ist der Putinismus getreten. Gestützt auf den Rohstoffreichtum des Landes hat es Putin vermocht, Russland nach den chaotischen Jahren der Jelzin-Ära neue Stabilität zu verleihen und einen erheblichen Teil der Bevölkerung an den Erträgen aus den Rohstoffexporten teilhaben zu lassen, hat nicht nur Parteibonzen zu Oligarchen gemacht, sondern auch eine konsumorientierte Mittelschicht entstehen lassen, die es zuvor in Russland nie gegeben hat. Hieraus ziehen die Putin-Versteher hierzulande ihre Argumente. Hinzu kommt ein sorgfältig inszenierter und medial verbreiteter Personenkult, der an Stalin erinnert. Der ehemalige KGB-Mann Putin reitet mit nacktem Oberkörper durch die Taiga und fängt immer den dicksten Fisch, beherrscht den Nationalsport Eishockey und trägt den schwarzen Gürtel, posiert als Rocker wie als gläubiger orthodoxer Christ. Trotz der fundamentalen Unterschiede gegenüber den Zeiten der Sowjetunion

hat sich in der westlichen Wahrnehmung die Überzeugung breit gemacht, dass der doppelte Transformationsprozess in Richtung Marktwirtschaft und Demokratie nicht vollzogen wurde. Seit es dabei ist, den alten russischen bzw. sowjetischen Herrschafts- und Einflussbereich in der Ukraine, in Weißrussland, im Kaukasus, aber auch in Syrien, in Mali und anderswo zu restaurieren, kehrt im Westen das Gefühl der russischen Bedrohung zurück, auch wenn die Russen bislang nur als Touristen gekommen sind. In dem Maße, wie sich Russland als neue Ordnungsmacht präsentiert, die sich mit der „schiitischen Achse“ vom Iran bis in den Libanon arrangiert, wird es auch wieder attraktiv für solche Länder, die ehemals zum Ostblock gehörten und heute Mitglied der EU sind bzw. mit der Mitgliedschaft geliebäugelt haben. Man denke nur an Ungarn oder Serbien. Damit erweist sich, dass die Grenze zwischen West- und Osteuropa zwar variabel, aber immer noch da ist und sehr viel älter ist als die des Ost-West-Konflikts. Lange als überwunden geglaubte Faktoren wie die Zugehörigkeit zur orthodoxen Kirche, die Nichtteilnahme an Renaissance und Aufklärung, die ausgebliebene Verbürgerlichung der Gesellschaft und vor allem die nicht erfolgte Emanzipation der Bauern, die nur von der Leibeigenschaft in die Kolchose gewechselt waren, erscheinen wieder relevant. Würde noch einmal über die Osterweiterung der EU verhandelt, würden die Kopenhagener Beitrittskriterien sehr viel restriktiver ausgelegt werden. Dass es auf absehbare Zeit tatsächlich weitere Mitglieder auf dem Westbalkan (Albanien, Bosnien, Serbien, Montenegro, Makedonien), in Osteuropa (Ukraine, Moldawien) oder im Kaukasus (Georgien, Armenien) gibt, ist nicht vorstellbar, auch wenn man aus aktuellem Anlass der Ukraine die Mitgliedschaft in ferner Zukunft in Aussicht stellt.

2. Wenn in den 1990er-Jahren der Industrialisierungsprozess in Ost- und Südostasien noch begrüßt wurde, weil ein Teil der Entwicklungsländer dabei war, es zu schaffen, weil sich neue Absatzmärkte eröffneten, weil von dort preiswerte und zugleich qualitativ hochwertige Produkte bezogen wurden und weil die kritischen Stimmen vor lauter China-Euphorie noch in der Unterzahl waren, hat sich heute das Bild radikal gewandelt. An die Stelle des Mythos vom China als dem neuen Land der unbegrenzten Möglichkeiten, der Alternative für alles und jedes, der Faszination für die alte Kulturnation ist die neuerliche Furcht vor der „gelben Gefahr“ getreten, auch wenn damit nicht mehr der Furor der mordbrennenden mongolischen Reiterheere, sondern die Niederkonkurierung der westlichen Industrie mit Hilfe von Produktpiraterie und unfairen Handelspraktiken, die Arbeitsplatzverluste als Folge der Deindustrialisierung gemeint sind.

Auch wenn sich die „japanische Herausforderung“ der 1970er-/80er-Jahre als Schimäre erwiesen hat und Japan jetzt selbst unter dem Druck des asiatischen Nachbarn steht, so bestimmt jetzt das Argument der großen Zahl die Wahrneh-

mung. China und demnächst Indien stellen zusammen mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung und sind mit ihren Exportindustrien in der Lage, einen globalen Strukturwandel der Weltwirtschaft zu erzwingen, an dessen Ende die Industrie und die arbeitsintensiven Dienstleistungen in Asien versammelt sind. Hinduismus, Buddhismus und Konfuzianismus erscheinen nicht mehr als modernisierungshemmende Faktoren. Ganz im Gegenteil, gerade der Konfuzianismus dient als Erklärung für hohe Bildungsorientierung, Autoritätshörigkeit gegenüber staatlichen Vorgaben und hohe Arbeitsmotivation, erklärt, warum das Modell des Bürokratischen Entwicklungsstaates funktioniert und in den kulturell von China beeinflussten Ländern kopiert wird. An die Stelle des neoliberalen Washington-Konsensus tritt der bürokratisch-autoritäre Beijing-Konsensus. Organisatorischer Ausdruck des chinesischen Führungsanspruchs ist die Shanghai Cooperation Organisation (SCO), in der westliche Mitglieder keinen Platz haben.

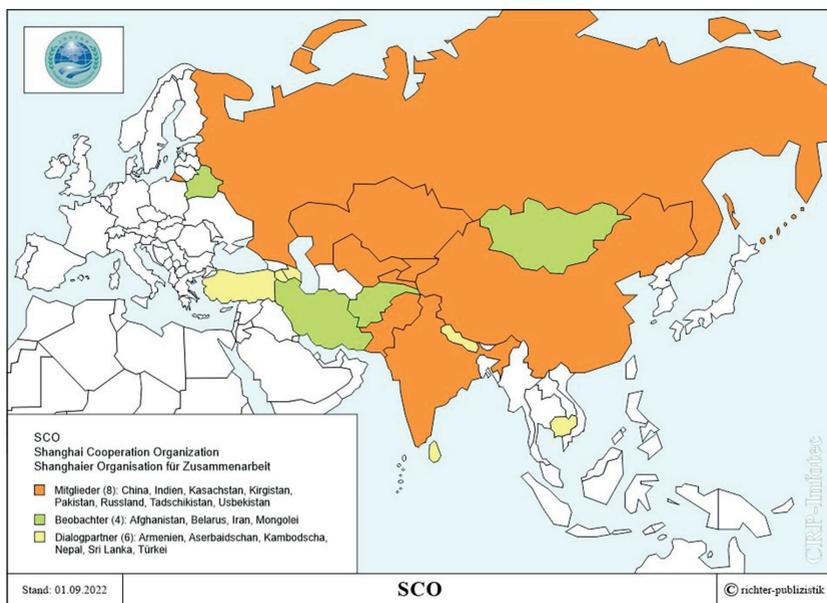


Abb. 6. Die Mitgliedsstaaten der Shanghai Cooperation Organisation.

Erschüttert wird auch das Dogma der Modernisierungstheorie, dass Industrialisierung, sozialer Wandel und Demokratisierung Hand in Hand gehen, dass am Ende die ganze Welt zwangsläufig verwestlicht wird. China demonstriert als „Werkbank der Welt“, dass sich ein autoritäres politisches System und eine leistungsfähige Industriegesellschaft durchaus vereinbaren lassen. Indien demonstriert als „Callcenter der Welt“, dass sich die Weltflucht des Hinduismus mit technischen Höchstleistungen, gerade auf dem EDV-Sektor, vereinbaren

lässt. Die Vorstellung, dass in absehbarer Zeit nicht mehr die USA, sondern China die globale Führungsmacht sein wird, stößt selbst bei früheren radikalen USA-Kritikern auf eine neue Nachdenklichkeit.

3. Die Wahrnehmung, dass der Norden bzw. der Westen „versüdtlicht“, hat mit dem Aufbruch zur neuen Völkerwanderung des Jahres 2015 eine andere Qualität bekommen. Früher ging es, zumindest in Europa, nur um den Umgang mit dem kolonialen Erbe, weil die europäischen Kolonialmächte der Anziehungspunkt von Migranten aus ihren ehemaligen Kolonien waren. Deutschland als nur kurzzeitige Minikolonialmacht war dabei fein heraus und dazu noch von Schengen-Staaten umgeben. Das exponentielle Wachstum der Migration, das viele Ursachen hat, aber vor allem das Resultat des exponentiellen Bevölkerungswachstums der letzten 30 Jahre ist, hat zu sozialen Verwerfungen und zu einer radikalen Grenzziehung in den Köpfen geführt, die sich in grassierender Fremdenfeindlichkeit weltweit, nicht nur in Europa und den USA, äußert. Dabei spielt es keine Rolle, wie viele Migranten tatsächlich ins Land gekommen sind und wie viele vor Ort sichtbar sind. Wie viel Fremdenfeindlichkeit es in afrikanischen und asiatischen Ländern gibt, erfahren wir nur sporadisch, wenn einzelne Fälle von den Medien aufgespießt werden. In Osteuropa, wo der Anteil der Migranten sehr viel geringer und kaum wahrnehmbar ist, ist die Fremdenfeindlichkeit höher als in Westeuropa. Selbst in Deutschland gibt es in dieser Hinsicht ein neues West-Ost-Gefälle. Das Phänomen ist ein schöner Beleg für die These, dass wir im postfaktischen Zeitalter leben. Nicht das, was ist, sondern wie das, was ist oder gerade nicht ist, wahrgenommen wird, bestimmt das Denken und das Handeln der Menschen. Die Umverteilung der Flüchtlinge in Europa funktioniert genauso wenig wie innerhalb von Deutschland, weil diese andere Wahrnehmungen haben als die, die die Verteilung organisieren wollen. In der Demographie nennt man das die Wirkung von Pull- und Push-Faktoren.
4. Während in den 1990er-Jahren die Debatte zwischen Fukuyama und Huntington unentschieden ausgegangen war, so dürfte heute Huntington bei einer Neuauflage ganz eindeutig als Sieger hervorgehen. Seinen damals so heftig kritisierten Satz, dass der Islam „blutige Grenzen“ habe, würden heute viele unterstreichen. Auch wenn es „den Islam“ gar nicht gibt und der Islam wie das Christentum viele Richtungen und Auslegungen kennt, wird er derzeit im Westen als ein Gebräu aus Islamismus, Terrorismus und Fanatismus gepaart mit allen Zutaten einer unaufgeklärten und traditionalistischen Gesellschaft wahrgenommen, die in makabrem Kontrast zum ölfinanzierten Luxus einer kleinen Elite am Persischen Golf steht. Das Orientalismusbild des 19. Jahrhunderts ist wieder präsent. Die neue Abgrenzung gegenüber Putins Osten oder den Chinesen, die uns unsere Arbeitsplätze wegnehmen, ist harmlos gemessen an der neuen Abgrenzung gegenüber den islamischen Ländern. Das Mittelmeer, damit sind wir bei der Tagespolitik, wird nicht mehr als ein ge-

meinsamer Raum wahrgenommen, an dessen Küsten und auf dessen Inseln sich die europäischen Touristen treffen, sondern als eine Grenze, die es zu verteidigen gilt. Malta bzw. die Malteser waren, nachdem die Johanniter Rhodos unter dem Druck der Osmanen räumen mussten, schon zu Zeiten Karls V. der westliche Vorposten, unterstützt von den Galeeren des genuesischen Condottiere Andrea Doria, gegen die Galeerenflotten Suleymans des Prächtigen. Heute trägt er den Namen Frontex. Selbst viele Botschafter der Willkommenskultur des Jahres 2015 haben sich mittlerweile stillschweigend in die Abwehrfront eingereiht, obwohl doch die tieferen Ursachen der neuen Völkerwanderung und das Ausmaß der weltweiten Flüchtlingsströme sich innerhalb so weniger Jahre nicht verändert haben. Schutz als neue Norm des Völkerrechts hat ausgedient. Libyen mutiert über Nacht vom Failed State zum sicheren Herkunftsland. Was sich verändert hat, ist die hiesige Wahrnehmung. Wieder gilt das Argument der großen Zahl.

5. Der radikalste Wandel, den selbst Huntington nicht für denkbar hielt, betrifft den atlantischen Kern der westlichen Identität. Vor 25 Jahren hatte er noch argumentiert, dass die fortschreitende europäische Integration zum Sprengsatz für die Einheit des Westens wird. Jetzt wird zu unserem Entsetzen die Einheit des Westens von der anderen Seite des Atlantiks in Frage gestellt, wenn die Trumpisten unter den Republikanern den Atlantizismus, die Sinnhaftigkeit der NATO, das liberale Welthandelsregime oder den kooperativen Ansatz der EU in Frage stellen. Mit diesem Programm war Trump angetreten und gewählt worden und will es ein zweites Mal! Europa reagiert darauf keineswegs mit mehr Geschlossenheit, sondern driftet selber auseinander. Nicht die gemeinsamen europäischen Werte, sondern die Furcht vor Putins Imperialismus hält die osteuropäischen Exit-Kandidaten bei der Stange. Europa à la Carte lautet die Devise bzw. drastischer Rosinenpicken, je nachdem, um was es geht, um den Euro, das Schengener Abkommen, den Agrarfonds oder die europäische Sicherheitspartnerschaft. Der Brexit wurde auch mit den polnischen und rumänischen Arbeitsmigranten begründet, die den Engländern ihre Arbeitsplätze wegnehmen. Jedenfalls tun sich auch in Europa Grenzen auf zwischen Ost und West, Nord und Süd, die in Wirklichkeit die ganz alten sind. Nicht die Neukonstruktion westlicher Identität, sondern deren Auflösung steht auf der Agenda. Die alten westlichen Eliten in Brüssel wie an der amerikanischen Ostküste sind in der Defensive und werden von den Populisten beiderseits des Atlantiks vor sich hergetrieben. An die Stelle der Idee, dass durch Kooperation alle gewinnen können, tritt das realistische Nullsummen-Denken, das auf die Selbsthilfe setzt. Was das Eigene gewinnt, muss das Fremde verlieren. Them vs. US. „Make America great again“ ging in Trumps Logik nur auf Kosten der anderen. Biden ist in seiner Buy American-Rhetorik zwar gemäßiger, in der Sache verfolgt er aber die gleiche Linie, wie die europäischen Irritationen über das 369 Mrd. US\$ schwere Subventionspaket für Investitionen in Klimaschutz, Energiesicherheit und Umwelttechnik demonstrieren. Das Programm klingt

zukunftsorientiert, birgt allerdings den Pferdefuß, dass es sich nur an amerikanische Produzenten in den USA richtet, die so gegenüber den europäischen Konkurrenten im Land einen massiven Wettbewerbsvorteil erhalten. Es wirkt indirekt sogar wie ein Sprengsatz für die EU, da nur die großen Mitglieder mit vergleichbaren Subventionspaketen reagieren können.

Fazit: Die Rückkehr des Eigenen und des Fremden bedeutet, dass wir das Ende einer Ordnung erleben, die auf Entgrenzung und Kooperation setzt, bedeutet die Rückkehr der Selbsthilfe in den internationalen Beziehungen. Das Eigene wird nicht nur enger gefasst, es ist dabei, sich neu zu erfinden unter Rückgriff auf ganz alte Erzählungen.

Additive Manufacturing: Challenges from manufacturing to process simulation with application to wire arc additive manufacturing

STEFAN HARTMANN

Institute of Applied Mechanics, Clausthal University of Technology,
Adolph-Roemer-Str. 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Germany

1 Introduction

Additive manufacturing processes are production processes in which a material is converted into a liquid phase and applied to the desired component with a time delay. The re-solidification process offers the possibility to produce components of almost any shape. One such manufacturing process is, for example, the powder bed fusion process, in which a laser is used to melt locally the layered powder, so that the component builds up layer by layer. The excess powder is then removed and recycled. Heating a polymer to form a polymer melt, which leads to the desired component by printing in filament form onto an existing substrate, is another procedure. This “printing” can be found in the build-up welding processes of metals or also in the use of concrete. In terms of production technology, the interest is in the temporal and spatial progression of the print head and the possibility of applying as much mass as possible in a short time (optimization of time and energy). On the other hand, there are the problems of deliquescence – if the material does not solidify in time, this leads to a high surface waviness or geometric inaccuracy – and poor or undesirable material quality (increased proportion of pores, micro-cracks, undesirable metallic crystal structures in metallic melts, etc.). The oldest additive manufacturing process could be considered to be the casting of metallic melts or concreting, but this is a very rough interpretation of the term. It is more likely to refer to “local” solidification processes in order to produce almost any component geometry.

Up to now, the process management has tended to be experience-based and implies transferring or applying previous knowledge to the new manufacturing boundary conditions for each new product. However, in order to achieve optimum product quality, it is desirable to map the manufacturing process on the computer, i.e. to predict it with the help of simulation programs. This would then make it possible to optimize the manufacturing process in advance with regard to the path of material application, process speed and material feed in order to obtain the best possible quality of the component. The difficulties here are to develop suitable mathematical models based on material science knowledge in order to obtain an optimal process control with the help of optimization methods – applied to efficient, numerical calculation methods to take into ac-

count the thermo-chemo-mechanical solidification behavior. As an example of this challenge and the issues that arise, the “wire-arc additive manufacturing” (WAAM) process (a form of arc welding) is considered below, see Fig. 1 and 2. The resulting questions and difficulties of modeling are transferable to other materials. For a literature review from a manufacturing technology perspective, see (Treutler and Wesling, 2021).



Abb. 1. Additive welding process with industrial robot.

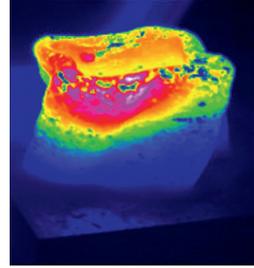


Abb. 2. Thermographic image.

2 Remarks on process simulation

The process simulation of components manufactured with WAAM requires a number of fundamental issues, see also (Gouge and Michaleris, 2018): (I) the modeling of mass, heat and momentum supply, (II) heat dissipation, (III) distortion and residual stresses, (IV) thermomechanical coupling, (V) temperature-dependent material properties, (VI) microstructural changes and precipitations as well as phase transformations. In addition, the simulations based on this must satisfy an efficient numerical implementation so that the required numerical calculations achieve time scales that are reasonable for the design process. Furthermore, the possibility must be provided to make welding processes calculable also with regard to control, see for example (Richter et al., 2022), as well as process optimization, (Tröger et al., 2024). In order to achieve these goals for mathematical and numerical modeling, experimental investigations are required to identify the material parameters occurring in the models on the one hand and to validate the numerical predictions on the other. In addition, fundamental continuum thermomechanical considerations must be included so that a continuous strategy of experiment, modeling, simulation, identification, and validation can be achieved.

The **material feed** of the wire, which is heated in the arc in such a way that it melts, i.e. it is converted into a liquid state, could be implemented in analogy to methods for water/ice transitions using numerical methods developed in fluid mechanics (level-set, fictitious domain), see (Boledi et al., 2022). This represents an extension of the eXtended FEM (Chessa et al., 2002; Zabaras et al., 2006). Here, the solidification, i.e. the solidification front propagating in the process, is of particular interest, which is formulated via further partial differential equations to describe the motion of the solidification front (for example, the interface modeled as a level set function). Basic simulations of the local droplet formation of the welding wire and the welding pool evolution can be found, for example, in (Mokrov et al., 2017). Here, the information required for the numerical simulation of the highly non-linear and temporally and spatially changing boundary conditions as well as the necessary initial and transition conditions remain unanswered. Solidification at the edge of the melt pool creates a front (transition area, mushy zone, or approximated by an interface) at which the transition from liquid to solid takes place. Such numerical considerations lead directly to the shape of the welding pool, which moves in space. In more precise investigations, droplet formation is simulated by electro-thermo-mechanical simulations in (Cadiou et al., 2020), which is performed with fluid mechanical considerations using a level set approach. This has not yet been applied to melting pool evolution.

The region of the welding pool only occupies a very small spatial area in real components in advanced production processes, the influence of which on the global temperature distribution is small, but is of great interest for the local consideration of solidification. The material inflow depends, among other things, on the welding speed, the wire feed, and the applied current and voltage. From the point of view of solid mechanics, the supply of the mass (welding material) is usually taken into account by different element activation strategies (Gouge and Michaleris, 2018), i.e. in each time step, as many additional elements are included in the calculation as result from the mass inflow according to specified criteria. For this purpose, the path of the material inflow is known in advance. If one is interested in path planning, computer science methods are of particular interest, see (Treutler et al., 2024). Three element activation strategies have been established. In “quiet element activation”, the entire region resulting after production is discretized into elements and the regions that do not yet exist during the simulation of the production process are modelled with a very small value (in the heat conduction equation, these are the heat capacity and the thermal conductivity), which, after space discretization with finite elements, always leads to the same size of the resulting non-linear system of equations at each time step. In addition to the proximity to singular functional matrices, the boundary conditions (radiation and convection) in particular must be adapted to the developed areas. In addition, very large non-linear systems of equations have to be calculated right from the start. In the “birth-and-death” strategy, only those unknowns

that are currently active are included in the non-linear systems of equations, see (Tröger and Hartmann, 2023). The size of the resulting systems of equations, on the other hand, is only ever as large as the number of unknowns associated with the activated elements. A hybrid option is to couple both methods layer by layer, which is referred to as a “hybrid” strategy (Michaleris et al., 2006; Michaleris, 2014; Gouge and Michaleris, 2018).

Nowadays, the **heat supply** is mainly described using the so-called Goldak model, in which a volumetrically distributed heat source is used (Goldak et al., 1984). Originally, the model was developed for “simple” joint welding processes and not for multi-layer build-up welding processes. The shape of the heat source corresponds to two composite quarter ellipsoids and is therefore characterized by four geometric parameters. A general orientation of these half double ellipsoids in space remains open, as a welding robot also allows angled positions of the supplied welding wire and thus the temperature and mass supply, as well as the determination of the parameters. Especially the coupling of the heat supply consisting of inclined position, welding pool model and its temporal development in the context of the discretization of the finite element method has not yet been described sufficiently. In addition, there are extended proposals in which a distribution of the energy input for melting the welding wire or the welding consumables is described (Montevicchi et al., 2016). Even more precise investigations of the local phenomena arise from fluid mechanical considerations themselves (Manvatkar et al., 2014; Mukherjee et al., 2017). In particular, the degree of modeling of the local heat supply is of special importance. If the degree of modelling of the local heat input is high and global structural-mechanical aspects of the simulation are of interest, the required dimensions of the finite elements near the welding pool would be so small that no meaningful simulations could be carried out with regard to the required computing times (Chiumenti et al., 2010) – unless sub-structuring techniques in combination with parallelization schemes are used (Murakawa et al., 2015; Huang et al., 2020). A local, simplified heat supply instead of the Goldak model is also proposed in (Kiran et al., 2022) to significantly minimize computation times. Since the energy supply can only be described inadequately with the Goldak model, suitable modeling of the heat input in the WAAM process is still of great interest.

The **heat dissipation** due to radiation and convection requires the coupling of two simulation domains in its detailed reproduction, see for example (Wendt et al., 2015) for the consideration of radiation with reflection and (Birken et al., 2010) for fluid-structure interaction for the representation of convection. The commonly used simplifications in the form of the Stefan-Boltzmann model for gray bodies and the linear model from convection coefficients multiplied by the temperature increase require improved relationships for the temperature-dependent emissivity and the convection coefficient. In particular, a temperature range from room temperature to over 1000°C leads to strongly non-linear relations due to the phase

transformation in the material and at the surface (Quint et al., 2011). Convection also depends on the temperature difference to the surrounding medium as well as the orientation and size of the surface of the body, (VDI, 2019). The influence of self-reflection on heat dissipation is unclear (for example, the heat radiation inside pipe samples is strongly reflected), as is the influence of convection on larger components or undulating surfaces. This would then require an additional coupling to the radiation simulation. For a coupling of different program systems for the consideration of radiation, see, for example, (Wendt et al., 2015).

Momentum supply is an area that has received little attention. In (Mokrov et al., 2017) and (Wu et al., 2020), the momentum exchange between the electrode and the component is discussed in addition to the mass and energy supply. However, the resulting forces are neglected in almost all simulations, although they contribute to the actual shaping of the welding bead. Alternatively, the resulting contours of the welding beads are either modeled with functions, but without going into the modeling of the formation of the bead geometries, (Prajadhiana et al., 2019; Ding et al., 2015), or thermal simulations are carried out taking capillary pressures into account, (Mohebbi et al., 2020). Here, FE-simulations could provide an initial indication of whether the extreme softness of the material in combination with the momentum supply leads to the wavy surfaces that are common in WAAM processes. These forces could also be the cause of the distortion.

Both the solidification process and the a priori unknown history of local heating and cooling lead to **distortion and residual stresses** in the component. The distortion is known from production technology in welding processes and is usually minimized based on experience. For example, the welding process is interrupted if the underlying layers are above a selected limit temperature. The material application is continued when a selected lower limit temperature is reached. What is desirable, however, is the possibility of numerical prediction in order to minimize or even largely exclude undesired deformations of the component through process optimization. This requires a constitutive model of thermo-viscoplasticity with large strains in the vicinity of the welding pool (in the remaining region, the assumption of small strains would be sufficient – possibly under the assumption of large displacements, which depends on the distortion). A comparison of different modeling approaches, 2D vs. 3D as well as the assumption of small deformations or large strains, can be found in (Michaleris et al., 2006), where – apart from the required computing times – the necessity of three-dimensional computations under the assumption of large strains is described for pure welding simulations of sheet metal. This assumption is also necessary because a large strain can occur for critical process parameters in the WAAM process. In addition, large strains are to be expected in the solidification area. The prediction of the evolution of residual stresses at higher temperatures requires a multi-scale model (Behrens et al., 2019), which also includes the microstructural evolution, precipitations, and phase transformations. However, this is currently hardly possible within the

simulation of additive manufacturing processes. Alternatively, model approaches that could at least take different phase transformations into account would be conceivable (Hallberg et al., 2007; Mahnken et al., 2009, 2012, 2015). However, the constitutive models used are either formulated under the assumption of small strains (classical approaches) or are based on different decompositions of a tensorial quantity that describes the deformation. Alternatively, purely spatial quantities can be used in (Kroon et al., 2021), which would also be possible in fluid simulations.

In the field of **thermomechanical coupling** – within the framework of the finite element method – there are a number of approaches that have developed historically on the one hand and depend on the degree of coupling on the other. As the purely mechanical stresses during the WAAM process are very small, the resulting dissipative effects are very low. Therefore, the production term in the heat equation is only very small and can be omitted. On the other hand, the assumptions of large deformations or different material properties due to structural changes and phase transformations lead to an influence on the temperature evolution, i.e. under certain conditions there is a full coupling of the partial differential equations for heat conduction and momentum. If, on the other hand, the coupling is not taken into account, the temperature development can be calculated on its own and then assumed as given in the simulation of the mechanical properties. In addition, there are various approaches for full coupling, e.g. (Rothe et al., 2015), which can be embedded in a consistent space-time discretization. After the space discretization with finite elements, the coupling of the heat conduction equation and the equilibrium conditions leads to so-called systems of differential-algebraic equation (DAE-systems). The DAE-systems have been solved in a number of works with the aid of stiffly-accurate, diagonally-implicit Runge-Kutta methods, which permit automatic, error-controlled time-step estimation. This does not change when using different material models (elasticity, rate-independent plasticity, viscoelasticity, or viscoplasticity). If inertia terms, i.e. fully dynamic processes, were to be taken into account, a coupling of systems of ordinary differential equations of first and second order would usually result. Special methods must then be used to reach the order of the time integration scheme for all variables, (Grafenhorst et al., 2017). Whether systems of ordinary differential equations or differential-algebraic equations result after the spatial discretization therefore depends on both the partial differential equations and the constitutive models used. Apart from contact problems, see (Grafenhorst, 2018), second order of the local time integration error is usually achieved, so that time adaptivity (error-controlled step size control) is possible. Since classic time integration methods (Backward-Euler, Crank-Nicolson) are included in this concept, there is a wide range of applications. It is essential for the implicit methods used that the resulting systems of non-linear equations can be solved efficiently. Starting vector estimates, the Newton-Raphson method, the Multilevel-Newton algorithm, the Newton-Chord approach and combina-

tions are available for this purpose (Hartmann et al., 2009). In addition, it must be examined in each case whether the occurring index of the DAE-systems changes in such a way that a classical procedure can actually be used or whether an index reduction technique must be introduced (Hairer et al., 1989, 1996). Attention must be paid to the development of spatial discretization, as this is directly linked to the time step-size (especially since additive manufacturing processes involve a non-smooth problem).

The prediction of the **microstructural properties, precipitations, and phase transformation** – in addition to the developing residual stresses – must be the real interest of the simulations and is considered an extreme challenge even today. The heating of the welding material, its solidification, the recurring heating to above the melting temperature through the renewed application of further welding layers and the cyclical heating of deeper welding layers leads to changing microstructures and thus material properties (recrystallization effects) during the process. The coupling of the calculation of the heat development of a build-up welding process with the microstructure development is described, for example, in (Johnson et al., 2018). A program based on the Monte-Carlo method from (Plimpton et al., 2009) is used there. (Babu, 2009) provides an overview of other program systems of commercial and open source products for considering the microstructural evolution. The widely used program ThermoCalc in (David et al., 2003) was used specifically for welding processes to predict the microstructural evolution. A common approach is to first calculate the temperature development numerically in order to then determine the microstructure development locally at the integration points of the finite elements or the nodes via the temperature development. In (Behrens et al., 2019), a sequential coupling of FE calculations with the phase-field program OpenPhase (2022) is used, whereby a representative volume element is evaluated last. The approach taken in (Mahnken et al., 2012) could be more effective for real and considerably more complex simulations, as a class of material models is proposed here at the macroscopic level.

Rather fundamental issues in additive manufacturing by deposition welding processes, which have hardly been discussed so far, are the continuum thermomechanical consideration of additive manufacturing processes as open systems and the consistent derivation of the resulting ODE or DAE system after spatial discretization using the finite element method. One of the basic problems is that the continuum-thermomechanical description of additive manufacturing processes in terms of kinematics, the existing balance equations and associated boundary conditions in the context of additive manufacturing has not yet been completed. In the actual sense, this is a so-called open system (Haupt, 2002). The description of the growth of material bodies, which is closely related to the description of open systems, was described in particular in (Naumov, 1994). A distinction is made between discrete processes (similar to the application of bricks to a wall or drops falling onto the surface of an existing

body) and continuous growth processes. Therefore, a transport of mass, energy and momentum (discrete/continuous – depending on the application or consideration) takes place. The kinematics and the balance equations are described in (Hodge and Papadopoulos, 2010), but must be extended to self-contact, as a layer-by-layer structure is created. For the self-contact problem, see for example (Wriggers, 2006) or (Grafenhorst, 2018) for coupling with the method of vertical lines. In addition, the envisaged applications tend to originate from the field of growth processes in bio-mechanics in connection with cell growth. The theoretical considerations are therefore to be transferred to additive manufacturing processes with layered structures. The numerical treatment is also directly related to this, whereby the concept of the method of vertical lines might be a possibility to be followed. Within the framework of spatial discretization using the finite element method, systems of ordinary differential equations (e.g. for the transient heat conduction equation) or differential-algebraic equations (for thermo-mechanically coupled problems or constitutive models of evolutionary-type) are created. Therefore, the clear derivation of the underlying weak forms and their spatial discretization based on the basic equations derived is an open problem. The resulting equations are then to be solved with suitable time integration methods, whereby time-adaptive, stiffly-accurate, diagonally-implicit Runge-Kutta methods have so far proven to be suitable for many coupled problems (Birken et al., 2010; Netz and Hartmann, 2015; Rothe et al., 2015a,b). However, the open question here is whether the highly complex process of the development of the spatial domain due to the mass supply and the associated coupling of space and time discretization have an influence on the local time integration error to be achieved.

One issue that is often not discussed in this context is inconsistent initial conditions in DAE-systems. Especially in “restart” calculations, where there are changing boundary conditions based on previously calculated welding processes, the initial conditions no longer fulfill the algebraic part of the DAE-system. Furthermore, the consistency of the initial conditions must also be fulfilled for element activation strategies taking into account the discretized equilibrium conditions, see (Hairer and Wanner, 1996) for the concept of consistent initial conditions for DAE-systems. Unfortunately, this is partly completely unclear in the literature on welding simulation.

3 Concluding remarks

In summary, it can be said that the modeling and simulation of build-up welding processes represent physically highly complex and challenging issues in a wide range of disciplines. The electro-thermomechanical properties in the vicinity of the welding pool including droplet formation, the fluid-structure interaction in both the region of the welding pool (solidification region) as well as the convection on wavy surfaces, the coupling of solid-state and radiation simulation to take into account the self-reflection of already welded sections, the microstructure

evolution for the prediction of distortion and residual stresses lead to a multi-scale, multi-physical problem. In addition, the system boundaries as well as the electrical, thermal, and mechanical loads acting on them change continuously and lead to boundaries that are characterized by waviness. A way out could be FE²-like approaches, see also (Hartmann et al., 2023) for the term and further literature, in which the microstructure simulations are coupled with methods of artificial intelligence, (Eivazi et al., 2023).

4 References

- Babu, S. S.: Thermodynamic and kinetic models for describing microstructure evolution during joining of metals and alloys, *International Materials Reviews* 54(6): 333–367, 2009.
- Behrens, B.-A., Schröder, J., Brands, D., Scheunemann, L., Niekamp, R., Chugreev, A., Sarhil, M., Uebing, S., Kock, C.: Experimental and numerical Investigations of the development of residual stresses in thermo-mechanically processed Cr-alloyed steel 1.3505, *Metals* 9: 480, 1–28, 2019.
- Birken, P., Quint, K. J., Hartmann, S., Meister, A.: A time-adaptive fluid-structure interaction method for thermal coupling, *Computing and Visualization in Science* 13 (7): 331–340, 2010.
- Boledi, L., Terschanski, B., Elgeti, S., Kowalski, J.: A level-set based space-time finite element approach to the modelling of solidification and melting processes, *Journal of Computational Physics* 457: 111047, 2022.
- Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., Le Masson, P.: 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam), *Additive Manufacturing* 36: 101541, 2020.
- Chessa, J., Smolinski, P., Belytschko, T.: The extended finite element method (XFEM) for solidification problems, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 53: 1959–1977, 2002.
- Chiumenti, M., Cervera, M., Salmi, A., de Saracibar, C. A., Dialami, N., Matsui, K.: Finite element modeling of multi-pass welding and shaped metal deposition processes, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 199: 2343–2359, 2010.
- David, S. A. , Babu, S. S., Vitek, J.M.: *Welding: Solidification and Microstructure*, *JOM* 55, 14–20, 2003.
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H.: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 31: 101–110, 2015.
- Eivazi, H., Tröger, J.-A., Wittek, S., Hartmann, S., Rausch, A.: FE² computations with deep neural networks: algorithmic structure, data generation, and implementation, *Mathematical and Computational Applications* 28(4), 91, 1–37, 2023.

- Goldak, J., Chakravarti, A., Bibby, M.: A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B* 15(2): 299–305, 1984.
- Gouge, M., Michaleris, P.: *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), 2018.
- Grafenhorst, M.: *Zeitadaptive Finite-Elemente-Berechnungen thermomechanisch gekoppelter Problemstellungen sowie Mortarkontakt*, Dissertation (Bericht 2/2018) am Institut für Technische Mechanik der TU Clausthal, 2018.
- Grafenhorst, M., Rang, J., Hartmann, S.: Time-adaptive finite element simulations of dynamical problems for temperature-dependent materials, *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 12(1): 57–91, 2017.
- Hairer, E., Lubich, C., Roche, M.: *The numerical solution of differential-algebraic systems by Runge-Kutta methods*, Springer, Berlin, 1989.
- Hairer, E., Wanner, G.: *Solving Ordinary Differential Equations II*. 2nd Edition. Springer, Berlin, 1996.
- Hallberg, H., Håkansson, P., Ristinmaa, M.: A constitutive Model for the Formation of Martensite in austenitic steels under large strain plasticity, *International Journal of Plasticity* 23(7): 1213–1239, 2007.
- Hartmann, S., Duintjer Tebbens, J., Quint, K.J., Meister, A.: Iterative solvers within sequences of large linear systems in non-linear structural mechanics, *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 89(9), 711–728, 2009.
- Hartmann, S., Dileep, P. K., Grafenhorst, M.: A time-adaptive FE²-approach within the method of vertical lines, *Computers & Mathematics with Applications* 151, 222–243, 2023.
- Haupt, P.: *Continuum Mechanics and Theory of Materials*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2002.
- Hodge, N., Papadopoulos, P.: A continuum theory of surface growth, *Proceedings of the Royal Society A* 466: 3135–3152, 2010.
- Huang, H., Ma, N., Chen, J., Feng, Z., Murakawa, H.: Toward large-scale simulation of residual stress and distortion in wire and arc additive manufacturing, *Additive Manufacturing* 34: 101248, 2020.
- Johnson, K. L., Rodgers, T. M., Underwood, O. D., Madison, J. D., Ford, K. R., Whetten, S. R., Dagel, D. J., Bishop, J. E.: Simulation and experimental comparison of the thermo-mechanical history and 3D microstructure evolution of 304L stainless steel tubes manufactured using LENS, *Computational Mechanics* 61: 559–574, 2018.
- Kiran, A., Li, Y., Hodek, J., Brázda, M., Urbánek, M., Džugan, J.: Heat source modeling and residual stress analysis for metal directed energy deposition additive manufacturing, *Metals* 15: 2545, 1–23, 2022.
- Kroon, M., Lindström, P., Rubin, M. B.: An Eulerian thermomechanical elastic-viscoplastic model with isotropic and directional hardening applied to computational welding mechanics, *Acta Mechanica* 232: 189–218, 2021.
- Mahnken, R., Schneidt, A., Antretter, T.: Macro modelling and homogenization for transformation induced plasticity of a low-alloy steel, *International Journal of Plasticity* 25: 183–204, 2009.

- Mahnken, R., Wolff, M., Schneidt, A., Böhm, M.: Multi-phase transformations at large strains – Ther-modynamic framework and simulation, *International Journal of Plasticity* 39: 1–26, 2012.
- Mahnken, R., Schneidt, A., Antretter, T., Ehlenbröcker, U., Wolff, M.: Multi-scale modeling of bainitic phase transformation in multi-variant polycrystalline low alloy steels, *International Journal of Solids and Structures* 54: 156–171, 2015.
- Manvatkar, V. , De, A., DebRoy, T.: Heat transfer and material flow during laser assisted multi-layer additive manufacturing, *Journal of Applied Physics* 116, 124905, 2014.
- Michaleris, P.: Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing process-es. *Finite Elements in Analysis and Design* 86: 51–60, 2014.
- Michaleris, P., Zhang, L., Bhide, S. R., Marugabandhu, P.: Evaluation of 2D, 3D and applied plastic strain methods for predicting buckling welding distortion and residual stress, *Science and Technology of Welding and Joining* 11(6): 707–716, 2006.
- Mohebbi, M. S., Kühn, M., Ploshikhin, V.: A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 109: 877–891, 2020.
- Mokrov, O., Lysnyi, O., Simon, M., Reisgen, U., Laschet, G., Apel, M.: Numerical investigation of droplet impact on the welding pool in gas metal arc welding, *Material Science & Engineering Technology* 48, 1206–1212, 2017.
- Montevecchi, F., Venturini, G., Scippa, A., Campatelli, G.: Finite element modelling of Wire-Arc-Additive-Manufacturing process, *Procedia CIRP* 55: 109–114, 2016.
- Mukherjee, T., W. Zhang, W., DebRoy, T.: An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, *Computational Materials Science* 126: 360–372, 2017.
- Murakawa, H., Ma, N., Huang, H.: Iterative substructure method employing concept of inherent strain for large-scale welding problems, *Weld World* 59: 53–63, 2015.
- Naumov, V. E.: Mechanics of growing deformable solids: a review, *Journal of Engineering Mechanics* 120(2): 207–220, 1994.
- Netz, T., Hartmann, S.: A monolithic finite element approach using high-order schemes in time and space applied to finite strain thermo-viscoelasticity, *Computers & Mathematics with Applications* 70(7), 1457–1480, 2015.
- OpenPhase. 2022. Available online: <http://www.openphase.de/>(accessed on 19 June 2022).
- Plimpton, S., Battaile, C., Chandross, M., Holm, L., Thompson, A., Tikare, V., Wagner, G., Webb, E., Zhou X.: Crossing the mesoscale no-man’s land via parallel kinetic Monte Carlo. SAND2009–6226, 966942, 2009.
- Prajadhama, K.P., Manurung, Y.H.P., Minggu, Z., Pengadau, F.H.S., Graf, M., Hälsig, A., Adams, T.-E., Choo, H. L.: Development of bead modelling for

- distortion analysis induced by wire arc additive manufacturing using FEM and experiment, *MATEC Web of Conferences* 269: 05003, 2019.
- Quint, K. J., Hartmann, S., Rothe, S., Saba, N., Steinhoff, K.: Experimental validation of high-order time integration for non-linear heat transfer problems, *Computational Mechanics*, 48 (1), 81–96, 2011.
- Richter, A.; Scheck, M.; Bohn, C.; Rembe, C.: Erfassung der Schmelzbadfläche mit Korrektur der Perspektive zur Prozessregelung eines Wire and Arc Additive Manufacturing. *tm – Technisches Messen* 89 (7–8), S. 525–533, 2022.
- Rothe, S., Erbts, P., Düster, A., Hartmann, S.: Monolithic and partitioned coupling schemes for thermo-viscoplasticity, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 293: 375–410, 2015a.
- Rothe, S., Schmidt, J.-H., Hartmann, S.: Analytical and numerical treatment of electro-thermo-mechanical coupling, *Archive of Applied Mechanics* 85, 1245–1264, 2015b.
- Treutler, K.; Wesling, V.: The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review. *Applied Sciences* 11 (18), 8619, 2021.
- Treutler, K., Gehling, T., Scheck, M., Richter, A., Bohn, C., Ehlers, R., Rembe, C., Wesling, V.: Properties oriented WAAM—microstructural and geometrical control in WAAM of low-alloy steel. *Welding in the World* 68, 247–257, 2024.
- Tröger, J.-A., Hartmann, S.: Thermal finite element simulations for extrusion-based additive manufacturing processes, in: *Tagungsband 5. Niedersächsisches Symposium Materialtechnik 23.–24.02.2023*, Hrsg. Clausthaler Zentrum für Materialtechnik, pp. 1–22, 2023.
- Tröger, J.-A., Hartmann, S., Treutler, K., Potschka, A., Wesling, V.: Simulation-based process parameter optimization for wire arc additive manufacturing, accepted for publication in *Progress in Additive Manufacturing*, 2024.
- VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*, 12. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2019.
- Wendt, G., Erbts, P., Düster, A.: Partitioned coupling strategies for multi-physically coupled radiative heat transfer problems, *Journal of Computational Physics* 300: 327–351, 2015.
- Wriggers, P.: *Computational Contact Mechanics*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.
- Wu, F., Falch, K. V., Guo, D., English, P., Drakopoulos, M., Mirihanage, W.: Time evolved force domination in arc weld pools, *Materials and Design* 190: 108534, 2020.
- Zabaras, N., Ganapathysubramanian, B., Tan, L.: Modelling dendritic solidification with melt convection using the extended finite element method. *Journal of Computational Physics* 218(1): 200–227, 2006.

Die Analyse der Luftzusammensetzung im Kontext wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Revolutionen

MATTHIAS TAMM

Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Technische Universität Braunschweig, Hagenring 30, 38106 Braunschweig

1 Motivation und Einleitung

Am 10.11.2023 habe ich vor dem Plenum der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) einen Vortrag mit obigem Titel gehalten. Grundlage waren Experimentalvorträge zum Thema Luft, die ich seit dem Beginn meiner Tätigkeit an der Technischen Universität Braunschweig im Jahre 2005 anlässlich verschiedener öffentlicher Veranstaltungen wie etwa dem TU-Day oder der TU-Night gehalten habe. Das Thema Luft eignet sich dabei besonders gut für populärwissenschaftliche Vorträge, da jeder Mensch mit diesem farblosen und unsichtbaren Gasgemisch, welches uns allgegenwärtig umgibt, vertraut ist und zumindest rudimentäre Kenntnisse über seine Zusammensetzung und Bedeutung für das Leben auf der Erde haben sollte. Abgesehen vom Wasserdampf ist die chemische Zusammensetzung der Luft bis in etwa 100 km Höhe konstant. Ihre Hauptbestandteile sind der Stickstoff mit ca. 78 %, der Sauerstoff mit ca. 21 % und das Edelgas Argon mit 0,9 %. Daneben gibt es eine Reihe von Spurengasen, von denen hier nur das Kohlenstoffdioxid mit ca. 0,04 % (400 ppm) und der Gehalt an den übrigen Edelgasen mit 0,002 % genannt werden sollen.

Dieses Wissen erscheint uns heute selbstverständlich, auch wenn entscheidende Experimente zur Analyse der Luftzusammensetzung erst in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts begonnen wurden, deren Erkenntnisse zahlreiche wissenschaftliche Revolutionen und den Zusammensturz teilweise jahrhundertealter Denkmodelle ausgelöst haben. Der damit einhergehende Technologiefortschritt steht dabei auch im Zusammenhang mit gesellschaftlichen Umbrüchen oder gar Revolutionen, und eine genauere Betrachtung und umfassende Darstellung dieser Implikationen schien dem Autor daher auch für einen Vortrag vor einer Gelehrten-gesellschaft wie der BWG angemessen. Dabei streift der Vortrag im Zusammenhang mit dem Thema Luft naturgemäß auch hochaktuelle gesellschaftspolitische Themen wie den Klimawandel und den Klimaschutz, und es muss betont werden, dass dieser Vortrag in keiner Weise den Anspruch erheben kann, einen grundlegenden Beitrag zum Verständnis der damit verbundenen komplexen Zusammenhänge zu leisten. Aber in einer Zeit, in der sich erstaunlich viele Menschen berufen fühlen, auch ohne rudimentäre chemische Kenntnisse mutig und meinungsstark an dieser Diskussion teilzunehmen, können Vorträge wie dieser, die diese Kenntnisse zumindest ein wenig auffrischen, sicher nicht schaden.

Der Vortrag basierte auf 28 Vortragsfolien, und der Versuch, die entsprechenden Abbildungen in das Redemanuskript zu integrieren, hätte den Rahmen dieses Buchbeitrags gesprengt. Daher werden die Folien für Interessierte in elektronischer Form unter dem am Ende des Beitrags angegebenen Link zur Verfügung gestellt. Im Folgenden wurde versucht, den Aufsatz auch ohne dieses Bildmaterial aus sich heraus verständlich zu gestalten.

2 Vier-Elemente-Lehre und Phlogistontheorie

Luft galt seit der Antike neben Feuer, Wasser und Erde als eines der vier unteilbaren Urelemente und wurde bis ins 18. Jahrhundert als einheitlicher Stoff betrachtet. Diese Vier-Elemente-Lehre geht auf den griechischen Naturphilosophen Empedokles (um 500 v. Chr.) zurück und wurde unter anderem von Platon und Aristoteles weiterentwickelt. Sie prägte die Wissenschaftsgeschichte über zwei Jahrtausende und bestimmte das naturwissenschaftliche Weltbild der Antike, fand aber auch Eingang in die Alchemie des späten Mittelalters und der frühen Neuzeit. Die ersten maßgeblichen Experimente zur Analyse der Luftzusammensetzung wurden jedoch erst ab 1770 durchgeführt. Zunächst wurde versucht, diese Ergebnisse in das im 17. und 18. Jahrhundert vorherrschende Materiekonzept, die sogenannte Phlogistontheorie des deutschen Arztes Georg Ernst Stahl, einzuordnen. Diese Theorie diente der wissenschaftlichen Erklärung von Verbrennungsprozessen und basierte auf der Annahme, dass alle brennbaren Stoffe ein unsichtbares Element namens Phlogiston enthalten, welches bei der Verbrennung freigesetzt wird und den phlogistonfreien und unbrennbaren Teil, die Asche, zurücklässt.

In diesem Gedankengebäude bewegten sich auch der deutsch-schwedische Apotheker Carl Wilhelm Scheele und der Engländer Joseph Priestley, die etwa zeitgleich den Sauerstoff durch die thermische Zersetzung von Metalloxiden oder Metallnitrat isolierten. Scheele ermittelte außerdem, dass nur ein Fünftel der Luft zur Verbrennung und Atmung taugt und nannte diesen Teil „Feuerluft“. Priestley verwendete ein spezielles Brennglas zum Entzünden des aufgefangenen Sauerstoffs und nannte diesen Bestandteil der Luft „dephlogisticated air“. Den weitaus größeren Teil der Luft, der bei Verbrennung übrigblieb, etwa $\frac{4}{5}$, also rund 80%, nannte Scheele „verdorbene Luft“ oder „Stickluft“, weil eine brennende Kerze sofort erlischt. Da Scheele seine Ergebnisse erst im Jahre 1777 publizieren konnte, gilt der Engländer Joseph Priestley allgemein als Entdecker des Sauerstoffs. In etwa zeitgleich befasste sich auch der schottische Chemiker und Botaniker Daniel Rutherford mit der Natur des Phlogistons und entdeckte dabei das Element Stickstoff. Rutherford setzte eine Maus in einen geschlossenen Behälter mit Luft, bis sie verendete. Im Anschluss entzündete er eine Kerze und verbrannte Phosphor, bis beide jeweils erloschen. Das entstandene Gasgemisch leitete er durch eine Lösung, welche das Kohlenstoffdioxid absorbierte. Die danach verbleibende Luft war nicht mehr brennbar. Über dieses Experiment berichtete Rutherford im Jahr

1772. In ähnlicher Weise wie bei Scheele und Priestley wurde der Begriff „phlogistische Luft“ bzw. „phlogisticated air“ für den nicht brennbaren Teil der Luft und einige Jahre später (1778) der Begriff „vitale Luft“ bzw. „vital air“ für den brennbaren Teil der Luft verwendet.

3 Oxidationstheorie nach Lavoisier

Obwohl die Phlogiston-Theorie einige Phänomene erklären konnte, wies sie insbesondere bei der Erklärung von Verbrennungsvorgängen erhebliche Schwächen auf. Antoine Laurent de Lavoisier, ein französischer Chemiker, führte schließlich Experimente durch, die zeigten, dass es sich bei der Verbrennung nicht um die Freisetzung von Phlogiston, sondern um die Aufnahme von Sauerstoff handelt. Seine Entdeckungen und die Entwicklung des Gesetzes der Massenerhaltung führten letztendlich zur Ablehnung der Phlogistontheorie und legten den Grundstein für das moderne Verständnis der Oxidation und Verbrennung in der Chemie. In Anlehnung an die Untersuchungen von Scheele und Priestley konnte er nachweisen, dass es sich bei der „Feuerluft“ bzw. „vitalen Luft“ um Sauerstoff handelt, den er „oxygène“ nannte. Zudem war er der erste, der den Zusammenhang zwischen Atmung und Verbrennung und das Prinzip der Oxidation erkannte. Seine Forschungsergebnisse widerlegten die Phlogistontheorie endgültig, womit er die vorherrschende Wissenschaftsmeinung geradezu revolutionierte. Als Krönung von Lavoisiers Schaffen erschien 1789 das Werk „Traité élémentaire de chimie“, das großen Einfluss auf die künftige Benennung chemischer Stoffe haben sollte. Lavoisier gilt bis heute als einer der Väter der modernen Chemie.

Ogleich Auslöser einer wissenschaftlichen Revolution wurde Lavoisier eine gesellschaftliche Revolution zum Verhängnis, denn er wurde 1793 im Zuge der französischen Revolution als Mitglied der Steuerpächter von Paris angeklagt und 1794 auf der Guillotine hingerichtet. Sein Freund, der Mathematiker Joseph-Louis Lagrange, zog ein verbittertes Resümee: „Es dauert nur wenige Sekunden, um einen Kopf abzuhacken, aber hundert Jahre dürften keinen ähnlichen hervorbringen können wie diesen Lavoisier.“ Es existiert eine unbestätigte Legende, die besagt, dass Lavoisier, als er zum Tode durch die Guillotine verurteilt wurde, sich dazu entschied, sein Leben mit einem Experiment zu beenden. Nachdem ihm der Kopf abgeschlagen wurde, wollte er versuchen, so oft wie möglich mit den Augen zu blinzeln, bevor er das Bewusstsein verlor, um zu demonstrieren, wie lange ein Mensch nach einer Enthauptung noch leben würde. Lavoisier blinzelte elf Mal.

4 Das Linde-Verfahren der Luftverflüssigung

Nach der Beschreibung der Entdeckung der Hauptbestandteile der Luft, Stickstoff und Sauerstoff, erfolgt nun ein Zeitsprung von ca. 100 Jahren vom Ende des

18. zum Ende des 19. Jahrhunderts, um das 1895 von Carl von Linde entwickelte Verfahren zur Luftverflüssigung vorzustellen. Mit dem Linde-Verfahren war es erstmals möglich, die Luft in ihre einzelnen Bestandteile zu zerlegen. Dabei wird die Eigenschaft von Gasen ausgenutzt, sich bei der Expansion abzukühlen. Dieser Vorgang wird als adiabatische Expansion bezeichnet, da der Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Isolierung verhindert wird. In der Alltagserfahrung kann die Abkühlung beim schnellen Ausströmen von Gas aus einem Druckbehälter beobachtet werden. Dabei kommt es zunächst zur schrittweisen Kondensation einzelner Fraktionen und anschließend zu einer weiteren Fraktionierung durch Destillation. Luftzerlegungsanlagen produzieren heutzutage großtechnisch bedeutende Mengen an Flüssigsauerstoff, Flüssigstickstoff und Edelgasen. Die Trennung der Luftbestandteile erfolgt dabei über ihre unterschiedlichen Siedepunkte, die für die Hauptkomponenten Stickstoff und Sauerstoff bei -196 bzw. -183 °C liegen. Dass der Sauerstoff bei höherer Temperatur („früher“) kondensiert als der Stickstoff, kann man sehr schön demonstrieren, indem man einen Kupferkegel mit flüssigem Stickstoff füllt. Nach dem Abkühlen beobachtet man an der Außenseite des Kegels eine Tropfenbildung, welche die Kondensation des Luftsauerstoffs anzeigt. Der Nachweis, dass es sich tatsächlich um Sauerstoff handelt, gelingt z. B. dadurch, dass sich eine glimmende Zigarette sofort entzündet und zeigt, dass auch tiefkalter Sauerstoff die Verbrennung heftig unterhält.

5 Stickstoff und das Haber-Bosch-Verfahren

Widmen wir uns im Folgenden nun etwas genauer den einzelnen Luftbestandteilen der Luft, wobei wir mit dem häufigsten Bestandteil, dem Stickstoff, beginnen, dessen Volumenanteil in der Luft 78% beträgt. Die Gewinnung erfolgt wie erwähnt nach dem Linde-Verfahren (Siedepunkt -196 °C). Sein Name erinnert an die oben beschriebene Entdeckungsgeschichte und bezieht sich auf sein inertes (reaktionsträges) Verhalten, da er die Verbrennung nicht unterhält. Die Stabilität des elementaren Stickstoffs lässt sich auf seine molekulare Struktur zurückführen, bei der im Distickstoffmolekül (N_2) eine N-N-Dreifachbindung vorliegt, welche zu den stärksten Element-Element-Bindungen überhaupt gehört. Die hohe Stabilität der N_2 -Moleküle stellt eine große Herausforderung dar, um den Luftstickstoff für chemische Reaktionen verfügbar und industriell nutzbar zu machen, auch wenn in der Natur einige prokaryotische Mikroorganismen, z. B. Knöllchenbakterien, in der Lage sind, eine biologische Stickstofffixierung mithilfe von Enzymen zu bewerkstelligen. Der revolutionäre Charakter ergibt sich in diesem Zusammenhang aus der Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens, bei dem der benötigte atmosphärische Stickstoff durch das Linde-Verfahren gewonnen wird. Die Chemiker Fritz Haber und Carl Bosch entwickelten Anfang des 20. Jahrhunderts das nach ihnen benannte Verfahren zur Herstellung von Ammoniak (NH_3) aus Luftstickstoff (N_2) und Wasserstoff (H_2). Die dabei notwendige Spaltung der starken N-N-Dreifachbindungen erfordert den Einsatz von Katalysatoren, wobei

dennoch hohe Drücke (250–350 bar) und hohe Temperaturen (400–500 °C) notwendig sind. Ammoniak ist eines der wichtigsten und häufigsten Produkte der chemischen Industrie, dessen Weltjahresproduktion etwa 150 Millionen Tonnen beträgt und für ca. ein Prozent des Weltenergiebedarfs verantwortlich sein soll. Fast 90 % des weltweit produzierten Ammoniaks wird zur Herstellung von Düngemitteln verwandt, wodurch die Bedeutung dieses Verfahrens für die Ernährung der Weltbevölkerung deutlich wird. So kann Ammoniak nach dem Ostwald-Verfahren mit Sauerstoff zu Salpetersäure (HNO_3) oxidiert werden, und die Vereinigung von Ammoniak und Salpetersäure führt zum Ammoniumnitrat (NH_4NO_3), einem der wichtigsten Düngemittel. Gleichzeitig ist Ammoniumnitrat aber auch ein bedeutender Sprengstoff, da es sich bei Entzündung oder Erwärmung leicht unter Rückbildung der stabilen N_2 -Moleküle zersetzt. Der große Bedarf und Vorrat an Ammoniumnitrat führte daher in der Vergangenheit wiederkehrend zu großen Unglücksfällen, wie etwa 1921 bei der Explosion des Oppauer Stickstoffwerkes, 2001 bei der Explosion einer Düngemittelfabrik in Toulouse, 2004 bei einem Zuganglück nahe Ryongchön in Nordkorea oder 2020 bei der Explosion im Hafen von Beirut im Libanon.

Fritz Haber und Carl Bosch wurden beide mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet, allerdings nicht gemeinsam. Haber erhielt diesen 1918 „for the synthesis of ammonia from its elements“, während Bosch 1931 zusammen mit Friedrich Bergius „in recognition of their contributions to the invention and development of chemical high-pressure methods“ ausgezeichnet wurde. Auch ein jüngerer Nobelpreis steht im Zusammenhang mit dem Haber-Bosch-Verfahren, da Gerhard Ertl vom Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft 2007 „for his studies of chemical processes on solid surfaces“ ausgezeichnet wurde. Damit wurden u. a. seine mechanistischen Arbeiten zur heterogenen Katalyse und dabei insbesondere auch zur Aktivierung des Stickstoffs an der Katalysatoroberfläche und seine nachfolgende Vereinigung mit dem Wasserstoff zum Ammoniak gewürdigt.

6 Sauerstoff und Ozon

Im Gegensatz zum reaktionsträgen Stickstoff („Stickluft“) haben wir uns oben bereits mit dem reaktionsfreudigen Sauerstoff („Feuerluft“) und dessen Bedeutung für die Entwicklung der Oxidationstheorie nach Lavoisier beschäftigt. Seine lebenserhaltende Rolle im Zusammenhang mit unserem Energiestoffwechsel wird uns mit jedem Atemzug bewusst, wobei ein Mensch im Durchschnitt täglich etwa 20.000 Atemzüge (ca. 14 pro Minute) macht und dabei etwa 10 Kubikmeter Luft (10.000 Liter bei 0,5 Litern pro Atemzug) „verbraucht“. Wie Stickstoff bildet auch der elementare Sauerstoff diatomare Moleküle; die zwei Sauerstoffatome sind dabei aber nicht durch eine Dreifach-, sondern durch eine Doppelbindung miteinander verknüpft. Auch diese Bindung ist recht stark, dennoch ist der Sauerstoff deutlich reaktiver als der Stickstoff und ein starkes Oxidationsmittel. Das

O_2 -Molekül besitzt zwei Valenzelektronen mehr als das N_2 -Molekül. Diese zwei zusätzlichen Elektronen besetzen im Grundzustand zwei sogenannte antibindende Molekülorbitale, ohne dabei ihren Elektronenspin zu paaren, wodurch der Sauerstoff paramagnetische Eigenschaften besitzt. Die Tatsache, dass der Sauerstoff uns mit seinen zwei ungepaarten Elektronen als sogenannter Triplett-Sauerstoff umgibt, ist für das Leben auf der Erde von entscheidender Bedeutung: Da Materie und so auch wir selber im Grundzustand ganz überwiegend keine ungepaarten Elektronen aufweisen, ist die Reaktion mit Sauerstoff kinetisch gehemmt, und wir werden glücklicherweise nicht augenblicklich oxidiert und in überwiegend Kohlenstoffdioxid und Wasser verwandelt, obwohl dies aus thermodynamischer Sicht sofort passieren müsste. Ein Leben unter Sauerstoff ohne ungepaarte Elektronen, sogenannter Singulett-Sauerstoff, wäre nicht möglich bzw. schnell beendet. Dieses „Spinverbot“ zeigt sich auch beim elementaren Sauerstoff selbst, welcher in flüssiger Phase eine charakteristische bläuliche Färbung aufweist. Diese rührt daher, dass hier im Gegensatz zum gasförmigen Zustand Stöße zwischen zwei Sauerstoffmolekülen viel häufiger sind, welche dann nur gemeinsam unter Absorption roter Strahlung in den Singulett-Zustand angeregt werden können. Wir beobachten daher die blaue Komplementärfarbe.

Auch wenn es kein prozentual wichtiger Bestandteil der Luft ist, sei mit dem Ozon noch eine weitere, und für das Leben auf der Erde ebenfalls bedeutsame Modifikation des Sauerstoffs erwähnt. Ozon besteht aus drei Sauerstoffatomen in Form eines gewinkelten O_3 -Moleküls und ist ein bläuliches, charakteristisch riechendes und äußerst reaktives Gas, welches bei -111 °C zu einer tiefblauen Flüssigkeit kondensiert. Bodennah kommt Ozon glücklicherweise meist nur in sehr geringer Konzentration vor, seine Bedeutung für das Leben ist aber praktisch jeder Person im Zusammenhang mit der Ozonschicht bewusst. Interessant ist sicherlich, dass man das Ozon in der Stratosphäre, der zweiten Schicht der Erdatmosphäre über der Troposphäre, in etwa 15–40 km Höhe am Abendhimmel während der sogenannten blauen Stunde mit dem bloßen Auge erkennen kann. Während die blaue Färbung des Himmels am Tage auf die Rayleigh-Streuung zurückzuführen ist, durch die der blaue, energiereiche Anteil des Sonnenlichts an den Teilchen in der Erdatmosphäre stärker gestreut wird als der rote, energieärmere Anteil, wird die blaue Farbe der Ozonmoleküle durch die gen Himmel gerichteten Lichtstrahlen der gerade untergegangenen Sonne sichtbar. Dort verrichtet das Ozon gute Dienste und absorbiert, wie auch der Disauerstoff (O_2), einen Teil der harten, kurzwelligen UV-Strahlung und schützt damit Pflanzen, Tiere und Menschen vor Strahlenschäden. Dabei stellt sich in der Stratosphäre ein Gleichgewicht aus Ozonbildung und -zerfall ein, welches durch menschengemachte Emissionen empfindlich gestört werden kann. Eine besondere Bedrohung für die Ozonschicht stellten dabei Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) dar, welche als Treibgase und Kühlmittel eine breite Verwendung fanden. Diese Verbindungen zeichnen sich für ihre Anwendung in Spraydosen oder Kühlschränken eigentlich idealerweise durch eine sehr große Stabilität aus, welche aber dazu führt, dass diese Verbindungen bis in

die Stratosphäre gelangen und erst dort durch die UV-Strahlung der Sonne zersetzt werden. Die dabei gebildeten Radikale, vor allem Chloratome, tragen dann katalytisch zu einem Abbau der Ozonschicht bei. Für die Erforschung dieser Zusammenhänge wurden Paul J. Crutzen, Mario J. Molina und F. Sherwood Rowland 1995 mit dem Chemie-Nobelpreis „for their work in atmospheric chemistry, particularly concerning the formation and decomposition of ozone“ ausgezeichnet.

So wichtig das Ozon in der Stratosphäre für den Schutz der Biosphäre ist, so problematisch ist das Auftreten von bodennahem Ozon während der Sommermonate bei besonders intensiver Sonneneinstrahlung, da Emissionen durch Autoverkehr oder Industrieaktivitäten vor allem in Städten zu einer Bildung von Ozon in gesundheitsgefährdenden Konzentrationen führen können. Verantwortlich dafür sind vor allem Stickoxide, also Verbindungen aus Stickstoff und Sauerstoff, die unter anderem in Verbrennungsmotoren entstehen. Diese Emissionen sind jedoch durch den Einsatz von Autoabgaskatalysatoren stark reduziert worden. Ozon entsteht auch beim Einsatz vor allem älterer Höhensonnen, wobei es, ähnlich wie in der Stratosphäre durch Sonnenstrahlung, durch das künstliche UV-Licht gebildet wird und durch den stechenden, chlorähnlichen Geruch wahrgenommen werden kann.

7 Edelgase

Kommen wir nun zu einer ganzen Gruppe von Gasen, die zusammen in der Luft zu weniger als einem Prozent vorkommen, uns aber durch ihre Verwendung z. B. als Füllgase in der Beleuchtungstechnik sehr vertraut sind. Es handelt sich um die Edelgase Helium, Neon, Argon, Krypton, Xenon und Radon. Mit Ausnahme des radioaktiven Radons werden die Edelgase durch Luftverflüssigung nach dem oben beschriebenen Linde-Verfahren gewonnen, wobei die Siedepunkte vom leichtesten Edelgas Helium (-269 °C) bis zum schwersten Edelgas Xenon (-109 °C) sukzessive ansteigen. Die Entdeckung der Edelgase stellt für mich ein besonders spannendes Kapitel der Wissenschaftsgeschichte dar, da ihre Existenz erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts nachgewiesen wurde und ihre Entdeckung zunächst auf große Vorbehalte stieß. Einen ersten Hinweis, dass die Luft neben Stickstoff und Sauerstoff noch ein weiteres, unreaktives Gas enthält, erhielt der englische Privatgelehrte Henry Cavendish bereits 1786 im Rahmen seiner klassischen Arbeiten über die Zusammensetzung der Luft, ohne sich dieser Entdeckung bewusst zu sein. Nach der chemischen Abtrennung von Sauerstoff und Stickstoff blieb eine kleine Gasblase zurück, die sich chemisch weder entfernen noch binden ließ. Diese Menge gab er als den nicht ganz 1/120. Teil der verwendeten Luftmenge an; wenn man bedenkt, dass die Edelgase nach heutigem Kenntnisstand etwa den 110. Teil der Luft ausmachen, so hatte Cavendish bereits unwissentlich den Edelgasgehalt der Luft recht genau bestimmt.

Angeregt durch diese Experimente gelang es erst mehr als 100 Jahre später, im Jahre 1894, dem schottischen Chemiker Sir William Ramsay zusammen mit dem englischen Physiker Lord Raleigh, das am häufigsten vorkommende Edelgas Argon (0,9 Volumen-%) als ein neues Element in diesem reaktionsträgen Rest nachzuweisen, nachdem letzterer bereits durch Dichtemessungen einen noch unbekannt, reaktionsträgen Bestandteil in der Luft vermutet hatte. Die Bestimmung der Wärmekapazität ergab, dass Argon ein einatomiges Gas ist, und Ramsay und Raleigh vermuteten, dass es eine ganze Gruppe solcher gasförmigen Elemente geben müsse. Diese Vermutung konnte Ramsay 1895 untermauern, als er Helium aus einem Uranmineral isolierte, in dem es durch den radioaktiven Zerfall von Uran gebildet und eingeschlossen worden war. Hinweise auf die Existenz des Elements Helium im Weltall, wo es nach dem Wasserstoff das zweithäufigste Element ist, gab es erstmals 1868, als der französische Astronom Jules Janssen während einer totalen Sonnenfinsternis Helium anhand einer charakteristischen Spektrallinie nachweisen konnte. Bis 1898 entdeckte Ramsay dann gemeinsam mit dem englischen Chemiker Morris William Travers die weiteren Edelgase Krypton, Neon und Xenon durch fraktionierte Destillation von Luft, was damals gerade erst durch das Linde-Verfahren möglich geworden war. 1905 folgte als letztes Edelgas das radioaktive Radon, das seltenste Gas in der Erdatmosphäre überhaupt. Die Bedeutung der Entdeckung der Edelgase zeigt sich in der Verleihung von gleich zwei Nobelpreisen im Jahr 1904: Sir William Ramsay erhielt den Nobelpreis für Chemie „in recognition of his services in the discovery of the inert gaseous elements in air, and his determination of their place in the periodic system“ und Lord Raleigh den Nobelpreis für Physik „for his investigations of the densities of the most important gases and for his discovery of argon in connection with these studies“.

Die Frage, warum die Entdeckung der Edelgase und ihre Einordnung in das zum Ende des 19. Jahrhunderts schon recht weit entwickelte Periodensystem der Elemente so große Probleme bereitete, verdient eine nähere Betrachtung. Ein System, in dem die Elemente nach aufsteigender Atommasse in Gruppen mit ähnlichen chemischen Eigenschaften geordnet sind, war bereits 1869 von dem russischen Chemiker Dmitri Mendelejew und dem deutschen Arzt und Chemiker Lothar Meyer unabhängig voneinander erkannt und veröffentlicht worden. Dieses System schien zunächst keinen Platz für eine weitere Gruppe zu lassen, und man war überzeugt, dass alle noch fehlenden Elemente Metalle sein müssten. Der Versuch, nun zunächst die Elemente Argon und Helium als einatomige Gase dort einzuordnen, wurde von einem Zeitgenossen mit den Worten kommentiert: „Argon and helium can at present be regarded only as a kind of chemical monsters brought unexpected and unwelcome, like the cuckoo, into the previously happy family of the elements where no place is provided for them“ (G. Kamensky, *Nature* **1897**, 57, 145). Erschwerend kommt hinzu, dass die Position des Argons eine der wenigen Abweichungen im Periodensystem der Elemente aufweist, bei der ein Element, hier das Argon mit der Ordnungszahl 18, schwerer ist als das folgende Element,

hier das Kalium mit der Ordnungszahl 19. Dies ist auf eine höhere Anzahl an Neutronen im Kern des häufigsten Argon-Isotops (^{40}Ar) im Vergleich zum häufigsten Kalium-Isotop (^{39}K) zurückzuführen. Erst 1913 konnte dieser Widerspruch zur oben genannten Ordnung der Elemente nach aufsteigender Atommasse durch den britischen Physiker Henry Moseley aufgeklärt werden, dessen gleichnamiges Gesetz den Zusammenhang zwischen der Ordnungszahl eines Elements und der Frequenz seiner Röntgenstrahlung beschreibt. Die Ordnungszahl – und damit die Grundlage für die Periodizität in der Ordnung der chemischen Elemente – entspricht der Anzahl der Protonen im Kern eines Elements; jedes Argon-Atom hat demnach 18 Protonen, jedes Kalium-Atom 19.

Protonen und Neutronen bilden zusammen als sogenannte Nukleonen die Atomkerne, in denen praktisch die gesamte Atommasse konzentriert ist. Die Atomhülle wird dagegen von Elektronen gebildet, deren Anzahl in einem neutral geladenen Atom derjenigen der Protonen entspricht. Die Verteilung und Anordnung der Elektronen bestimmt die Eigenschaften und die Reaktivität des jeweiligen Elements, wobei die Edelgase entsprechend ihrer Stellung im Periodensystem am Ende der jeweiligen Periode vollständig gefüllte und abgeschlossene Valenzelektronenschalen besitzen. Daraus resultieren ihr atomarer Charakter und ihre geringe Reaktivität. Lange Zeit war es daher ein Dogma, dass Edelgase keine chemischen Bindungen eingehen können, und so war es wiederum eine wissenschaftliche Revolution, als in den 1960er-Jahren mit den Xenonfluoriden wie XeF_2 , XeF_4 und XeF_6 die ersten Edelgasverbindungen beschrieben wurden. Die Bildung dieser Verbindungen steht nicht im Widerspruch zur Reaktionsträgheit der Edelgase, sondern zeigt, dass im Falle des schweren Edelgases Xenon in Kombination mit Fluor, dem elektronegativsten Element und damit stärksten Oxidationsmittel, durchaus stabile Verbindungen entstehen können. Für die Zusammensetzung der Luft spielen Edelgasverbindungen allerdings überhaupt keine Rolle, und dass ihnen im Rahmen dieses Vortrages überhaupt ein ganzer Abschnitt gewidmet wurde, ist vor allem meinem eigenen großen Interesse an dieser Thematik zu verdanken, da ich mich im Jahr 2000 mit einer Lehrprobe zum Thema „Edelgasverbindungen“ habilitiert habe.

8 Kohlenstoffdioxid

Eine nähere Betrachtung verdient schließlich das Kohlenstoffdioxid (CO_2), das trotz seiner geringen Konzentration von „nur“ ca. 0,04 % (400 ppm) wegen seiner Bedeutung für die Klimaerwärmung der derzeit wohl am meisten diskutierte Luftbestandteil ist. Die Entdeckung dieses Gases wird dem schottischen Arzt Joseph Black zugeschrieben, der in seiner Doktorarbeit von 1754 unter anderem mit Magnesiumcarbonat (MgCO_3) experimentierte, aus dem durch Erhitzen oder Ansäuern Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden kann. Black nannte das entstehende Gas „fixed air“ (gebundene Luft), erkannte aber auch, dass es sich von gewöhnlicher

Luft unterschied. So konnte dieses Gas eine Kerze löschen und war schwerer als Luft. Auch wenn Black die Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff in der „fixen Luft“ noch nicht nachweisen konnte, so hatten seine Arbeiten doch großen Einfluss auf Lavoisier, der zeigte, dass Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung von Kohlenstoff unter Sauerstoffaufnahme (Oxidation) und auch als Produkt von Stoffwechselfvorgängen wie der Atmung oder Gärung entsteht. Aus dem Alltag ist uns Kohlenstoffdioxid als Füllmittel in Feuerlöschern bekannt, wo es unter Druck (50–60 bar) komprimiert in flüssiger Form vorliegt. Unter Normaldruck weist Kohlenstoffdioxid jedoch eine Besonderheit auf: Bei einer Temperatur von $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ geht es direkt vom festen in den gasförmigen Zustand über (Sublimation), und das so genannte Trockeneis (festes CO_2) ist ein wichtiges Kühlmittel für industrielle und medizinische Anwendungen. Da Kohlenstoffdioxid eine etwa 40-mal höhere Löslichkeit in Wasser besitzt als Sauerstoff, findet es unter dem chemisch nicht ganz korrekten Namen „Kohlensäure“ seine uns vertraute Anwendung in Erfrischungsgetränken.

Kohlenstoffdioxid spielt eine überlebenswichtige Rolle für fast alle Pflanzen, Algen und einige Bakterien, die durch Photosynthese mit Hilfe der Energie des Sonnenlichts aus Kohlenstoffdioxid und Wasser komplexe organische Verbindungen, vor allem Kohlenhydrate wie Glucose (Traubenzucker), aufbauen und dabei Sauerstoff freisetzen. Tiere und Menschen sind auf die kontinuierliche Bildung von Sauerstoff angewiesen, denn in Umkehrung der Photosynthese benötigen wir den Sauerstoff zur Atmung und verbrauchen ihn, um Glucose zur Energiegewinnung wieder in Kohlenstoffdioxid und Wasser umzuwandeln. Ein Mensch atmet dabei durchschnittlich ein Kilogramm CO_2 pro Tag aus. Der Beitrag der menschlichen Atmung zum sogenannten Treibhauseffekt kann im Vergleich zu anderen menschlichen Aktivitäten jedoch als minimal angesehen werden, da das ausgestoßene CO_2 aus der Nahrung stammt, die zuvor durch Photosynthese erzeugt wurde, beim Fleischkonsum über den Umweg eines Pflanzenfressers. Der Treibhauseffekt ist in erster Linie ein natürlicher Prozess, der dafür verantwortlich ist, dass auf der Erdoberfläche über alle Jahreszeiten und Regionen gemittelt eine angenehme Durchschnittstemperatur von etwa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ herrscht. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt läge diese bei etwa $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, was für die meisten Lebensformen zu kalt wäre. Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid, aber auch Methan (CH_4), Distickstoffmonoxid („Lachgas“, N_2O) und Wasserdampf (H_2O), haben die Eigenschaft, Infrarotstrahlung zu absorbieren und dadurch zu Schwingungen angeregt zu werden. Beim linearen CO_2 -Molekül sind dies Streck- und Biegeschwingungen, wobei letztere, die längerwellige Biegeschwingung, besonders effektiv zum Treibhauseffekt beiträgt. Die Energie der angeregten Schwingungszustände kann dann ebenfalls unter Abgabe von Infrarotstrahlung, umgangssprachlich auch Wärmestrahlung, in alle Raumrichtungen abgegeben werden, und somit auch auf die Erde zurückgeworfen werden.

Mit dem vorstehenden Abschnitt soll der anthropogene, d. h. der vom Menschen verursachte Anteil am Treibhauseffekt keineswegs verharmlost, sondern lediglich die heute meist grundsätzlich negative Konnotation des Begriffs in Frage gestellt werden. Es ist völlig unstrittig, dass der sehr rasche Anstieg des CO_2 -Gehalts in der Atmosphäre seit der industriellen Revolution und danach vor allem in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts auf menschliche Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Erdöl, Erdgas), die Zement- und Stahlproduktion, die Brandrodung großer Waldflächen und die anschließende intensive landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen ist. Eine umfassende Diskussion all dieser Faktoren und möglicher Gegenmaßnahmen zur Begrenzung des Ausstoßes von Treibhausgasen und zur Verlangsamung der globalen Erwärmung würde natürlich den Rahmen dieses Vortrags sprengen, und der Autor erhebt auch nicht den Anspruch, auf diesem Gebiet – abgesehen von seinem chemischen Fachwissen – über besonders fundierte Kenntnisse zu verfügen. Im revolutionären Kontext dieses Vortrags bleibt die Hoffnung auf weitere wissenschaftliche Revolutionen, die nachhaltig den Ausstoß von Treibhausgasen oder sogar ihren Gehalt in der Atmosphäre reduzieren. Denn es liegt auf der Hand, dass auch gesellschaftliche Revolutionen und Umwälzungen die Folge eines weiteren raschen Temperaturanstiegs sein können, etwa wenn durch den Klimawandel bestimmte Klimazonen unbewohnbar werden und die damit verbundenen Herausforderungen wie die Ernährung der Weltbevölkerung oder ungesteuerte Migration bewältigt werden müssen.

9 Fazit

Es bleibt zu hoffen, dass ich mit diesem Vortrag verdeutlichen konnte, wie ein so selbstverständliches und uns ständig umgebendes Medium wie die Luft einerseits der Gegenstand großer wissenschaftlicher Revolutionen war, bei deren Erforschung und Analyse ihrer Zusammensetzung erstaunlich spät, vor allem im 18. und 19. Jahrhundert, ganze Denkbauwerke zum Einsturz gebracht wurden und sich völlig neue wissenschaftliche Theorien durchsetzen konnten. Andererseits ist die Luft aufgrund ihrer Allgegenwärtigkeit und ihrer Bedeutung für alles Leben auf der Erde ein Gut, mit dem wir sorgsam umgehen und das wir im wahrsten Sinne des Wortes rein halten müssen. Andernfalls könnten auch gesellschaftliche Revolutionen die Folge sein, und zwar nicht nur im positiven Sinne einer Modernisierung und Wohlstandsmehrung im Zuge des geschilderten Erkenntnisgewinns, sondern tatsächlich auch im Sinne eines nachhaltigen Strukturwandels, der einhergeht mit Fragen der Klimaerwärmung und des Klimaschutzes, Fragen der Umweltverschmutzung und der Luftreinhaltung und so weiter. Bei all diesen wichtigen Diskussionen kann chemischer Sachverstand sicher nicht schaden, und ich hoffe, mit diesem Vortrag ein wenig zu dessen Konsolidierung beigetragen zu haben.

10 Danksagung und Quellennachweise

Ich danke den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die mich in der Vergangenheit regelmäßig bei der Durchführung öffentlicher Experimentalvorlesungen unterstützt haben, da ein Vortrag zum Thema Luft durch zahlreiche unterhaltsame und lehrreiche Versuche und Demonstrationen begleitet werden kann. Als Quelle für diesen Vortrag und seine Vorgängerversionen dienten über die Jahre zahlreiche Lehrbücher und immer wieder auch das World Wide Web. Auf die Angabe umfangreicher Quellennachweise muss daher verzichtet werden, und der Autor übernimmt keine Haftung für falsche oder unrichtige Angaben. Die Vortragsfolien sind unter dem folgenden Link abrufbar: https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_2/IAAC/Dokumente/Allgemein/Plenarvortrag_Luft_BWG_2023.pdf.

Holt die Therapie jemals die Alzheimer-Krankheit ein?

MARTIN KORTE

Abt. Zelluläre Neurobiologie, TU Braunschweig und AG NIND, HZI

Es ist eine Errungenschaft 20. Jahrhunderts und nicht zuletzt der medizinischen Grundlagenforschung, dass in den westlichen Industrienationen mehr als die Hälfte der Bevölkerung 70 Jahre oder älter wird. In den 5.000 Jahren vor dem Jahre 1900 hat sich allen Berechnungen nach die Lebenserwartung der Gattung Mensch um fast 27 Jahre verlängert – ziemlich genau die Zahl, um die sich allein von 1900 bis zum Jahre 2000 die Lebenserwartung nochmals um 27 Jahre verlängert hat. In nur 100 Jahren! Von allen Menschen, die auf diesem Planeten jemals über 65 Jahre alt geworden sind, leben 50% heute – 500 Millionen sind es zurzeit! Noch im Jahre 1900 sind nur 19% der Menschen älter als 65 Jahre geworden! Heute sind es 75%! Im Jahre 2030 werden die Menschen über 65 zum ersten Mal in der Menschheitsgeschichte zahlreicher sein, als die Kinder unter 5 Jahren. Wer 2005 geboren wurde hat eine reelle Chance, 100 Jahre alt zu werden (als Altersdurchschnitt!) und genau genommen werden wir seit 100 Jahren jeden Tag sechs Stunden älter.

Aber das Alter ist auch mit Risiken verbunden und dazu gehört auch die Erkrankung an einer Demenz, zu der auch die Alzheimer-Erkrankung gehört. Allein die Vorstellung, sein Gedächtnis zu verlieren, ist beängstigend. Leider ist sie aber keine Phantasie, sondern in Form der Alzheimer-Erkrankung mitten unter uns, millionenfach. Den Betroffenen kommt langsam aber sicher ihr gesamtes Gedächtnis abhanden: alles, was sie je erlebt und an Wissen erworben haben. Menschen, die an Alzheimer leiden, büßen im Krankheitsverlauf noch weitere kognitive Fähigkeiten ein (dazu gehören der Umgang mit Geld, die räumliche Orientierung und oft auch das Sprachvermögen), aber es ist der Gedächtnisverlust, der den Patienten und auch seine Angehörigen am meisten trifft. Denn mit dem Verlust des Gedächtnisses geht der Verlust vieler gemeinsamer Bande mit der Welt, den Menschen aus dem Umfeld und mit sich selbst einher.

Es gibt fünfzig verschiedene Formen der Demenz. Alzheimer ist die berühmteste und auch häufigste Form. Man schätzt, dass 70% aller Demenz-Patienten an Alzheimer leiden. Im Zuge der Auswirkungen auf unser Gedächtnis sei diese Erkrankung hier exemplarisch beleuchtet als der gesellschaftliche relevanteste Gedächtnisdieb unserer Zeit. Wenn wir keine wirksamen Gegenmaßnahmen entwickeln, wird sich die Zahl der Demenz-Kranken dramatisch erhöhen. Ein paar Fakten:

- 2001 litten 24,4 Millionen Menschen weltweit an einer Alzheimer-Demenz (AD), die Zuwachsrate wurde auf 4,6 Millionen neuerkrankte Menschen pro Jahr geschätzt.
- 2010 waren es bereits 36 Millionen Erkrankte.
- 2024 schätzt man, dass circa 51 Millionen Menschen weltweit an ihr leiden (die Zahlen stammen aus dem Dachverband aller Alzheimer-Organisationen, dem Alzheimer's Disease International, kurz ADI), und alles deutet darauf hin, dass die Anzahl der Menschen mit AD sich alle zwanzig Jahre verdoppeln wird.
- 2030 rechnet man mit 75 Millionen erkrankten Menschen
- und im Jahr 2050 mit über 150 Millionen.

Jedes Jahr diagnostizieren Ärzte/innen mittlerweile fast zehn Millionen Neuerkrankungen (mehr als das Doppelte im Vergleich zum Jahr 2001). Ein Großteil dieses starken Anstiegs kann auf Neuerkrankungen in Entwicklungsländern zurückgeführt werden. Aber allein in Deutschland leben wahrscheinlich 1,7 Millionen Demenzpatienten (von denen zwei Drittel an Alzheimer erkrankt sind), und auch deren Anzahl wird sich in Anlehnung an den weltweiten Trend mit der zunehmenden Alterung der Gesellschaft in den nächsten zwanzig Jahren verdoppeln, wenn nicht ein Gegenmittel gefunden sowie Präventionsmöglichkeiten erforscht und genutzt werden. Die Zahlen aus den USA sind ebenfalls beeindruckend: Dort leben über sechs Millionen Erkrankte (2007 waren es „nur“ 3,5 Millionen). Um die Zahlen einordnen zu können: Allein in den USA sind 2021 viermal mehr Menschen an Alzheimer erkrankt, als Menschen weltweit bei Verkehrsunfällen umkommen! Anders ausgedrückt: In Europa, ebenso wie in den USA, bedeutet das, dass von 1.000 Menschen 150 von AD betroffen sein werden. Zum Vergleich: Zwei von 1.000 Menschen erleiden einen Schlaganfall, einer von 1.000 ein Gehirntrauma durch einen Unfall, zehn von 1.000 leiden an Parkinson.

Erdrückende Zahlen, die belegen wie wichtig es ist, neurodegenerative Erkrankungen zu bekämpfen. Die Wahrscheinlichkeit, zu erkranken, steigt mit dem Alter; deshalb wird die Krankheit mit der Zunahme des Durchschnittsalters weiter derart galoppierend voranschreiten. Die weltweit durch die Alzheimer-Krankheit verursachten Kosten belaufen sich nach Schätzungen des renommierten World Alzheimer Report auf 800 Milliarden Euro (wenn diese Ausgaben allein für Alzheimer in einem Land wären, so entspräche die Summe dem Bruttosozialprodukt des 18. reichsten Landes der Erde). Bereits im Jahre 2020 werden die Ausgaben die Billionengrenze überschreiten. Die Pflege eines Alzheimerpatienten in Deutschland kostet im Jahr über 30.000 Euro. Die Alzheimer-Erkrankung kann über viele Jahre voranschreiten, oft brauchen die Betroffenen mehr als ein Jahrzehnt lang Pflege. Dabei belaufen sich die Kosten pro Jahr allein für Deutschland auf 45 Milliarden Euro für die medizinische Versorgung von Alzheimer-Patienten. Wenn die Prognosen tatsächlich stimmen, wird ein erheblicher Teil des Gesundheitsbudgets der Bundesrepublik Deutschland allein für die Versorgung von Alzheimer-Patienten verschlungen werden. Diese nackten Zahlen lassen die

Schicksale, die sich hinter der Diagnose Alzheimer verbergen, nur erahnen. Die Erkrankung trifft dabei nicht nur den Patienten selbst, sondern immer die gesamte Familie, vor allem diejenigen, die es übernehmen, die Patienten zu pflegen. Kurzum: AD ist ein gesellschaftliches Phänomen von höchster Brisanz.

Pathophysiologie der Alzheimer Erkrankung

Insbesondere zwei Eiweißmoleküle stehen im Verdacht, zum Untergang so vieler Nervenzellen zu führen und dadurch die Alzheimer-Erkrankung auszulösen; sie tragen die prosaischen Namen A β und Tau. A β ist ein 40 bis 42 Aminosäuren langes Eiweißmolekül (Peptid), A β - oder β -Amyloid genannt, das von bestimmten Enzymen aus einem wesentlich längeren Eiweißmolekül, dem Amyloid-Vorläuferprotein (Amyloid Precursor Protein, APP), herausgeschnitten wird. APP liegt übrigens auf dem Chromosom 21, das bei der Trisomie 21 (Down-Syndrom) in einer überzähligen Form vorliegt; in der Tat haben Menschen mit einer Trisomie neben anderen gesundheitlichen Problemen ein sehr hohes Risiko, an Alzheimer zu erkranken. Das Amyloid-Vorläuferprotein sitzt in der Zellmembran – der äußeren Hülle der Nervenzelle – und kann an drei verschiedenen Stellen von molekularen Scheren (Sekretasen) zerschnitten werden. Wird APP vom Enzym α -Sekretase gespalten, entstehen harmlose Fragmente, die möglicherweise sogar eine positive Wirkung für die Stabilität von Synapsen und den daran stattfindenden plastischen Vorgängen haben. Schlagen Beta- und γ -Sekretase jedoch gleichzeitig zu, bildet sich β -Amyloid, das außerhalb der Nervenzellen zu großen Proteinknäueln, sogenannten Amyloid-Plaques, verklumpen kann.

Zu den mysteriösen Dingen der Alzheimer-Erkrankung gehört, dass die berühmten A β -Plaques seit Alois Alzheimers erstmaliger Beschreibung des Krankheitsbildes im Jahr 1906 als charakteristisch für diese Form der Demenz gelten, ohne dass ihre genaue Rolle im Krankheitsverlauf klar ist. Diese werden auch im gesunden Gehirn gebildet, und es gibt Studien, die belegen, dass auch 90 Jahre alte Menschen erhebliche Mengen dieser Ablagerungen aufweisen, ohne in ihren Gedächtnisfunktionen eingeschränkt zu sein. Insofern kann die Frage, warum A β im alternden Gehirn auf einmal Plaques bildet, das noch dazu toxisch wirkt, nicht eindeutig beantwortet werden. Eine Theorie geht davon, dass die Plaques vor allem durch entzündliche Reaktionen, die durch ihre extrazelluläre Anwesenheit ausgelöst werden, umliegende Nervenzellen massiv schädigen. Nicht die Plaques an sich sind also schädlich, erst zusammen mit dem Immunsystem des Gehirns lösen sie die Krankheit aus. Damit rücken entzündliche Prozesse im Gehirn, aber auch in unserem Körper insgesamt, stärker in den Mittelpunkt der Forschung.

Das zweite Molekül, das möglicherweise die Alzheimer-Demenz auslöst, ist Tau. Es ist ein Eiweiß, das in den langen Axonen der Nervenzellen vorkommt. Bereits Alois Alzheimer hat beschrieben, dass in den Nervenzellen von Alzheimer-Patienten neben den Plaques Neurofibrillenbündel zu finden sind. Hierbei handelt es sich – im Unterschied zu den Plaques, die sich außerhalb der Nervenzellen befinden – um Eiweißablagerungen innerhalb der Zellen, die aus bestimmten Skelettkomponenten der Zellen entstanden sind. Wie man heute weiß, bestehen sie zu einem erheblichen Teil aus Tau. Dieses Eiweiß stabilisiert in den Axonen wiederum andere Strukturelemente, die Mikrotubuli, eine Art Skelett in den Zellen, das anders als das Körperskelett des Menschen aus beweglichen Eiweißmolekülen besteht. Zusammen mit anderen Zellskelettelementen sorgen diese Mikrotubuli nicht nur für eine gewisse Stabilität der Zellen, sie sind auch die „Eisenbahnschienen“, auf denen innerhalb der Zellen „Güter“ transportiert werden, etwa die Mitochondrien, die Energiekraftwerke der Zellen. Axonale Fortsätze können bis zu einem Meter lang sein. Wenn der Transport kollabiert, stirbt die Zelle ab. Bei der Alzheimer-Erkrankung konnte nun beobachtet werden, dass die neurofibrillären Bündel vor allem durch ein verändertes Tau verursacht werden, dem zu viele stark negativ geladene kleine Molekülgruppen angehängt werden. Dadurch löst Tau sich von den Mikrotubuli ab, und diese fallen mangels Stabilisierung in sich zusammen. Die dadurch entstehenden neurofibrillären Bündel stören nun das Gleichgewicht der Zellen, wesentliche Transportprozesse in den Nervenzellen finden nicht mehr statt.

Wie es dazu kommt, dass sich mit zunehmendem Alter dieses veränderte Tau ansammelt, ist bislang nicht geklärt. Eine Theorie besagt, dass über die Plaques aus A β eine Calcium-Signalkaskade in den umliegenden Zellen ausgelöst wird, die dazu führt, dass viele Phosphatgruppen an das Tau angebunden werden. Nach dieser Theorie, wären die A β -Ablagerungen die Ursache der Alzheimer Erkrankungen, wohingegen die von A β ausgelösten Veränderungen am Tau-Molekül die Ursache des Absterbens von Neuronen, wären, was dann bewirkt, dass das innere Skelett von Neuronen zusammenbricht.

Die Statistiken am Anfang dieses Alzheimer-Artikels suggerieren, Alzheimer breite sich aus wie eine Epidemie. Dieser Umstand wurde noch dadurch befeuert, dass Neurologen tatsächlich berichteten, dass die Krankheit übertragen werden könne. Aber AD ist keine Infektion, und es ist kein einziger Fall bekannt, in dem sich ein Angehöriger, der einen Alzheimer-Patienten pflegte, „angesteckt“ hat. Die Zunahme der Alzheimer-Patienten ist allein in der Alterspyramide begründet: Je älter Menschen werden, umso größer ist das Risiko, an Alzheimer zu erkranken.

Man sieht, die Symptomatik und der Verlauf einer Alzheimer-Erkrankung können bis in die biochemischen Details hinein aufgeklärt werden. Die alles entscheidende wissenschaftliche Einsicht über Ursache und Auslöser, vor allem darüber, wel-

che Maßnahmen das Auftreten verhindern können und wo eine effektive Therapie ansetzen sollte, fehlt aber noch immer. Alles, was die jahrelange Forschung bisher herausgefunden hat, beschränkt sich darauf, Symptome zu erklären, dagegen wissen wir noch nicht einmal, wann genau die Erkrankung beginnt und was die oben beschriebenen Veränderungen am A β und am Tau auslöst.

Die vorherrschende Meinung über den Gedächtnisdieb Alzheimer-Erkrankung ist, dass A β und Tau in irgendeiner Form beteiligt sind. Aber es gibt es eben nur Indizien für das Ende des Tatherganges, während Motive und die Vorgeschichte wie „Planung“ des Raubes, um im Bild zu bleiben, weiter unklar sind. Es mangelt weder an Theorien, warum Alzheimer entsteht, noch an therapeutischen Substanzen, die in klinischen Untersuchungen getestet wurden, allerdings ohne Erfolg. Selbst neue Antikörper-Therapien gegen A β , die man Patienten im Endstadium der Erkrankung gibt, können den Krankheitsverlauf nur in einem geringen Maß verzögern und sind extrem teuer.

Hier nun die Forschungsstrategie, die in meiner Abteilung an der TU Braunschweig verfolgt wird: Wir müssen meiner Meinung nach Abschied nehmen von einer linearen Betrachtungsweise des Krankheitsverlaufes, die mit A β beginnt und in einer geraden Linie mit dem Zelltod aufhört. Viel wahrscheinlicher ist, dass ein Dutzend Faktoren gemeinsam dazu führen, dass ältere Gehirne von der Alzheimer-Erkrankung befallen werden. Am Ende dieser Kaskade stehen vermutlich Veränderungen hinsichtlich des A β zu einer Form, die es toxisch macht und zu einer massiven Zellschädigung durch ebenfalls verändertes Tau führt.

Aber es gibt eine ganze Reihe Faktoren, die die Entstehung von AD und die Geschwindigkeit des Krankheitsverlaufes beeinflussen:

- Hier sind zum einen genetische Risikofaktoren, wie ApoE4, zu nennen. ApoE4 beeinträchtigt die Energieversorgung des Gehirns, den Cholesterintransport und die Bluthirnschranke.
- Entzündliche Prozesse in unserem Körper machen wiederum neuroinflammatorische Prozesse in unseren Gehirnen wahrscheinlicher. Da alle Zweige des angeborenen Immunsystems im Alter verstärkt aktiv sind, erklärt dies womöglich, warum AD gerade im Alter seine zerstörerische Kraft wirksam werden lässt. Übergewicht, spezifisch im viszeralen Bauchbereich, erhöht hierbei das Risiko solch entzündlicher Prozesse (Bauchfett ist eben neben einem Energiespeicher auch das größte immunologische Organ in unserem Körper und produziert große Mengen an entzündungsfördernden Signalmolekülen). Auch bestimmte Infektionskrankheiten können das AD-Risiko erhöhen, insbesondere eine schwere Sepsis, bei der sich der Patient auf die Intensivstation begeben muss.
- Eine energetische Unterversorgung des Gehirns ist ein weiterer Risikofaktor. Sie kann durch einen Diabetes bedingt sein oder indem durch eine stark kohlenhy-

dratlastige Ernährung die Dichte der Insulinrezeptoren auf Neuronen reduziert wird (was auf Dauer die Versorgung dieser Zellen mit Glukose verschlechtert). Auch die Kraftwerke der Zellen, die Mitochondrien können Abnormitäten aufweisen, die wohl bedingt ist durch die Alterung der Neurone und Gliazellen (Seneszenz). Dies hat nicht nur eine Unterversorgung mit Energie zur Folge, sondern kann auch den oxidativen Stress in Form von Sauerstoffradikalen für die Zelle erhöhen.

- Es gibt zudem es eine Reihe von Wechselwirkungen mit dem Abbau von A β . Kann dieses nicht wirksam von Zellen geschluckt oder aus dem Gehirn abtransportiert werden, lagert es sich im Gehirn ab, wie Müll auf der Straße, der von der Müllabfuhr nicht abgeholt wird.
- Darüber hinaus wird diskutiert, dass Beeinträchtigungen der Blut-Hirnschranke und der Zellmembran-Integrität von Neuronen sowie die Protein-Abfallentsorgung und Protein-Neusynthese ebenso wie Veränderungen im Gleichgewicht des Calciumspiegels der Neurone zu Beginn, im Verlauf und zum beschleunigten Ende der Alzheimer-Krankheit beitragen könnten.

All diese Faktoren könnten beeinflussen, welche Form von A β generiert, wieviel A β abgelagert wird und in welchen Mengen dadurch verändertes Tau entsteht.

Wie kann es aber zu verschiedenen A β -Varianten kommen? A β wird aus einem Vorläufer Protein (dem APP, Amyloid-precursor protein)) abgespalten, aber dieser Weg ist nicht zwangsläufig. Aus dem Vorläufer können auch andere Fragmente gebildet werden, die sogar Vorteile für die Speicherfähigkeit und für das Überleben von Neuronen mit sich bringen, wie Untersuchungen von Ulrike Müller in Heidelberg zusammen mit meiner Arbeitsgruppe in Braunschweig zeigen konnten. Unter den oben genannten Bedingungen wird aus dem langen Vorläufer Protein von A β , statt APP α (welches eine schützende Funktion hat), stark vermehrt A β gebildet. Die physiologische Funktion dieser veränderten Aufspaltung von APP ist unbekannt. Vermutet wird, dass A β unter Bedingungen von zellulärem Stress vermehrt gebildet wird und entweder eine ursprüngliche Funktion im Immunsystem hat, oder aber, dass es an die Umgebung von Neuronen, vor allem an Mikrogliazellen, signalisieren soll, dass Neurone unter Stress stehen. Zusammengefasst bedeutet das vermutlich: Alles, was Zellen in ihrem Gleichgewicht (Homöostase) gefährdet, erhöht das Risiko, an AD zu erkranken.

Die Wahrscheinlichkeit, an Alzheimer oder einer anderen Demenz zu erkranken, steigt mit dem Alter. Nur in einer seltenen Ausprägung der familiären Alzheimer-Erkrankung, die vererbt wird, und über deren Risikofaktoren man inzwischen einiges weiß, erkranken auch vergleichsweise junge Menschen (manchmal sogar unter 50 Jahre alt) an AD. Von dieser familiären Form von AD sind aber nur wenige Prozent der Erkrankten betroffen. Die Frage, die sich hier seit vielen Jahren stellt, ist, ob die sporadische Form von AD nicht eine notwendige und unausweichliche Folge der Alterung unserer Gehirne ist und wir entsprechend nichts

dagegen tun können – es sei denn, wir stoppen den Alterungsprozess des Körpers insgesamt.

Gegen diese Theorie spricht, dass es tatsächlich neben dem Alter noch andere Risikofaktoren gibt, die in jedem Fall bestimmen, wann die Krankheit ausbricht und wie schnell sie verläuft (s. Tabelle 1 und 2). Zu diesen Risikofaktoren gehören Rauchen und Fettstoffwechselstörungen, die jeweils die Wahrscheinlichkeit, an AD zu erkranken, um den Faktor 2 erhöhen. Neben dem Rauchen erhöht Übergewicht das Alzheimer-Risiko, vor allem wenn der Body-Mass-Index (BMI) schon vor dem 50. Lebensjahr über 30 lag. Der BMI errechnet sich aus dem Körpergewicht in kg dividiert durch die Körpergröße multipliziert mit der Körpergröße (in Meter). Wer also 1,80 m groß ist und 100 kg wiegt, hat einen BMI von über 30. Dass sowohl Rauchen als auch Übergewicht nicht gesund sind, weiß man zu Genüge – warum aber sollte es das Alzheimer-Risiko erhöhen? Weil sowohl Rauchen als auch Fettpolster zu ständigen kleinen Entzündungen im Körper führen, die die Immunreaktion auf Proteinausfällungen im Gehirn (Plaques) verstärken und damit die Sterberate von Nervenzellen erhöhen. Vor allem Bauchfett scheint Entzündungsreaktionen im Körper zu fördern und die schädlichen Effekte von Plaques im Gehirn noch zu potenzieren. Mit anderen Worten: Ein Mensch, der regelmäßig raucht und/oder stark übergewichtig ist, geht ein doppelt so hohes Risiko ein, an Alzheimer zu erkranken. Weiter erhöht wird das Risiko bei chronischem Alkoholmissbrauch, Diabetes, (2- bis 3-fach erhöhtes Risiko), koronarer Herzerkrankung (2- bis 4-fach erhöht), Bluthochdruck (5-fach höheres Risiko) oder Herzrhythmusstörungen (6- bis 18-fach erhöht).

Die Zahlen zeigen eindrucklich, welchen Unterschied es machen kann, z. B. körperlich aktiv zu sein und Sport zu treiben: So haben Männer, die körperlich wenig aktiv sind, ein 13-prozentiges Risiko, im Alter von achtzig Jahren an AD zu erkranken, treiben sie dagegen regelmäßig Sport oder sind körperlich aktiv, so sinkt das Risiko auf 2,4%. Für Frauen sinkt das Risiko von 17% (sportlich inaktiv) auf 3% (körperlich aktiv). Dramatisch auch der Effekt des Bildungsstandards: Bezogen auf 1.000 Menschen erhöht sich die Anzahl der Alzheimer-Erkrankung um 148 Personen, wenn man hierbei von einem niedrigen Bildungsstand ausgeht! Der Begriff der Bildungsgerechtigkeit und der Bildungschancen bekommt hier eine ganz neue Dimension – eine wesentliche Prävention von Alzheimer könnte darin bestehen, den durchschnittlichen Bildungsstandard in einem Land zu steigern (davon hätte jede Gesellschaft in jeglicher Hinsicht etwas).

Risikofaktoren

Nachdem fast 30 % der über 85-Jährigen an Alzheimer erkranken, liegt es nahe zu glauben, dass der Krankheitsbeginn in diese Lebensspanne fällt. Allerdings haben Studien gezeigt, dass der Beginn der Krankheit häufig schon vor dem 50. Geburtstag liegt, wobei die ersten Symptome oft erst zwischen zehn und dreißig Jahren nach dem unbemerkten Auslösen der Erkrankung sichtbar werden. Anders gesagt: Die Erkrankung kann bis zu dreißig Jahre lang „unsichtbar“ sein. Was aber auch heißt, dass es möglich ist, ihren Ausbruch deutlich nach hinten zu schieben, vorausgesetzt, man kennt und beachtet die Risikofaktoren. Insofern ist es sinnvoll, sich bereits frühzeitig und weit vor dem Renteneintritt mit dem Altern und den damit einhergehenden Krankheiten zu beschäftigen und danach zu leben, wie ich in meinem Buch „Jung im Kopf“ ausgeführt habe. Die gute Nachricht dabei ist, dass die Faktoren, die das Gehirn langsamer altern lassen, auch die Elemente sind, die das Risiko, an Alzheimer oder einer anderen Form der Demenz zu erkranken, vermindern.

Tab. 1 der geschätzten Risiken für eine Alzheimer-Demenz. Eine Zahl größer als 1 bedeutet eine Zunahme des Risikos, eine Zahl kleiner als 1 eine schützende Funktion.

Risikofaktor	Durchschnittliches Risiko einer Erkrankung an AD
Erhöhtes Risiko	
BMI über 30 (Fettleibigkeit)	1,69
ApoE4 Allel (genetisches Risiko)	6,50
Wenig körperliche Betätigung	2,84
Bluthochdruck	1,81
Niedriger Bildungsstandard	4,08
Niedrigeres Risiko	
Kaffee trinken (2-3 Tassen am Tag)	0,76
Alkohol (0,1l/Tag Wein oder Bier)	0,77
Gesunde Ernährung (wenig Kohlehydrate, wenig Fleisch, viel Obst, Gemüse, Fisch)	0,74
Hoher Bildungsstandard	0,51
Regelmäßige körperliche Betätigung	0,53
<i>Quelle: K. Taylor, The fragile brain, Oxford University Press, 2016.</i>	

Tab. 2: Geschätztes Alzheimer-Risiko, Anzahl der erwarteten Fälle pro 1.000 Personen

Risikofaktor	65-69 Jahre		85-89 Jahre	
	Männer	Frauen	Männer	Frauen
A+B: Geschätztes Risiko- profil, (gesamt)	15	18	151	202
A) Kein ApoE4 Allele	1	2	13	18
B) ApoE4 Allel vorhanden	14	16	138	184
A) Diabetes	10	11	96	128
B) Kein Diabetes	5	7	55	74
A) Niedriger Bildungs- standard	13	16	135	180
B) Hoher Bildungsstandard	2	2	16	22
A) Niedrige körperliche Fitness	13	15	127	170
B) hohe körperliche Fitness	2	3	24	32
A) Normalgewicht	5	7	70	90
B) Starkes Übergewicht	12	15	109	115
<i>Quelle: K. Taylor, The fragile brain, Oxford University Press, 2016.</i>				

Umwelfaktoren, die zeigen, was man tun kann, um den Verlauf von AD zu bremsen

Aber auch vor dem Hintergrund des Risikos, an Alzheimer zu erkranken, bleibt festzuhalten, dass Altern keine Krankheit ist, sondern eine Entwicklungsstufe! Und auch wenn Altern ein unumkehrbarer Prozess ist und Jungbrunnen ebenso wie Anti-Aging-Mittel nur in Marketingabteilungen von Kosmetikherstellern und einigen Pharmafirmen existieren, so gibt es doch wissenschaftliche Evidenzen für eine Reihe von möglichen Maßnahmen, mittels derer wir es sehr wohl vermögen, kognitive Alterungsprozesse zu verlangsamen und die Stärken des alternden Gehirns (ja, die gibt es!) gegenüber den Schwächen auszubauen. Mit vielen von ihnen kann man zu jeder Zeit in seinem Leben beginnen und einen positiven Effekt auf das Altern erhoffen – sowohl gegen Erkrankungen des Gehirns, als auch für eine Verlangsamung der Gehirnalterung. Es gehört auch zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen der Altersforschung: Wer im Alter von 75 Jahren noch ein optimal leistungsfähiges Gehirn haben will, sollte schon vor dem 50. Lebensjahr damit anfangen, etwas dafür zu tun. Spätestens ab dann heißt es: Gewicht regulieren, sich regelmäßig bewegen, gesund ernähren und das Gehirn trainieren.

Mens sana in corpore sano – diese lateinische Redewendung über den Zusammenhang, der zwischen einem gesunden Körper und einem gesunden Geist besteht, ist ein verkürztes Zitat aus den Satiren des römischen Dichters Juvenal. Dort heißt es: „Beten sollte man darum, dass in einem gesunden Körper ein gesunder Geist sei.“ Juvenal beabsichtigte damit, seine Mitbürger bloßzustellen, da sie für alles Mögliche beteten, ohne sich selbst zu bemühen. Dies gilt auch heute für viele von uns. Wir haben sehr wohl die Möglichkeit, Einfluss auf unsere Leistungsfähigkeit zu nehmen, aber wir müssen sie auch nutzen und aktiv werden.

Motorische Bewegung wirkt positiv auf den Erhalt unserer Gehirnfunktion und -anatomie. Und überraschenderweise erweist sich hier: Was für das Herz gut ist, ist es auch für das Gehirn. Wer sich regelmäßig sportlich betätigt, nicht übergewichtig ist und nicht raucht, kann zehn bis fünfzehn gesunde Jahre dazu gewinnen, wie gleich mehrere Langzeitstudien an älteren Menschen zeigen. Und es gibt weitere positive Effekte: Bewegung verringert das Risiko von Demenz, Schlaganfall, Diabetes, Fettleibigkeit, Depression, Herz-Kreislaufkrankungen, Brust- und Darmkrebs. Überraschend dabei ist aber, dass sich Fitnesstraining auch, ja man kann sogar sagen: im besonderen Maße, auf die kognitiven Fähigkeiten unseres Gehirns auswirkt. Wissenschaftliche Befunde zeigen, sportliche Betätigung erhält die kognitive Leistungsfähigkeit im Alter länger, als dies bei Senioren der Fall ist, die keinen Sport treiben. Dies mag unserer populären Ansicht über die geistige Fitness von Profisportlern vielleicht entgegenstehen, doch hier gilt – wie so oft im Leben –, man kann auch zu viel des Guten tun. Eine umgekehrte U-Funktion besagt, dass man bei sportlicher Betätigung bis zu einem bestimmten Punkt einen positiven Effekt auf die Gesundheit beobachten kann, ab da dreht sich der Effekt aber ins Gegenteil um. So leben Leistungssportler keineswegs länger als normale Sportler, und wer sieben Mal pro Woche ein leichtes Ausdauertraining absolviert, weist im statischen Durchschnitt keine höhere kognitive Leistung auf als jemand, der dies nur drei Mal die Woche tut.

Schon ein geringes sportliches Engagement reicht aus, um einen größtmöglichen Effekt für das Gehirn und dessen Alterung zu erzielen: drei Mal die Woche 40 Minuten trainieren, bei gleichmäßigen, rhythmischen Bewegungsabläufen, die großen Muskelgruppen einbeziehen. Letzteres ist selbst für Neurowissenschaftler ein überraschender Befund, glaubte man doch lange, dass Muskelarbeit in keiner Weise das Gehirn beeinflussen würde. Man nahm an, das Gehirn werde immer gleich mit Blut versorgt, da es, was die Blutversorgung angeht, vor allen Organen eine Art Vorfahrtsrecht genießt, mit anderen Worten, also immer eine konstante Menge Blut bekommt, egal, ob wir gerade schlafen oder einen Marathon laufen. Im Wesentlichen stimmt das auch, aber diese Betrachtungsweise hat übersehen, dass das Gehirn selbst seine Aktivität erhöhen muss, um die Muskelfasern der Muskeln anzusteuern. Und dabei gilt: Gehirnareale, die vermehrt aktiv sind, werden innerhalb von Sekunden auch besser durchblutet.

Darüber hinaus wirken die Wachstumsfaktoren, die nach Muskelaktivierung (Training) die Muskeln wachsen lassen, auch auf das Gehirn. Sie bewirken hier die Ausschüttung von BDNF (brain-derived neurotrophic factor, übersetzt in etwa der Nervenwachstumsfaktor des Gehirns), von dem man vermutet, dass es die Struktur von Nervenzellen positiv stimulieren kann (es können Synapsen und Dendritenbäume wachsen), die Neurogenese im adulten Gehirn fördert und die Neuronen vor dem Untergang schützt (neuroprotektive Wirkung von BDNF). Die Freisetzung von BDNF im Gehirn wird durch mindestens zwei Tätigkeiten erreicht: Lernen und Bewegung. Und beides wirkt sich noch auf einen anderen Mechanismus aus, der Gehirn vor dem Verfall schützt: auf die adulte Neurogenese. Gerd Kempermann, Neurowissenschaftler an der Universität Dresden, konnte diesen Zusammenhang erstmals im Labor von Fred Gage belegen, einer der weltweit meistzitierten Neurowissenschaftler. Er zeigte, dass bei Mäusen, die eine Aufgabe lernen mussten und sich dabei viel bewegen durften, die Anzahl von neuen Nervenzellen im Hippocampus im Vergleich zu einer untrainierten Kontrollgruppe erhöht war. Der Befund ist deshalb so spannend, weil er einen Erklärungsansatz dafür bietet, dass von allen kognitiven Fähigkeiten vor allem das Gedächtnis von sportlicher Betätigung profitiert, schließlich ist der Hippocampus maßgeblich für das autobiographische und das Faktengedächtnis. Die neugebildeten Nervenzellen können zum einen neue Informationen kodieren, zum anderen können sie einem altersbedingten Verlust von Nervenzellen im Hippocampus entgegenwirken.

All dies führt zu der Annahme, dass auch im menschlichen Gehirn vermehrt neue Nervenzellen gebildet bzw. in existierende neuronale Schaltkreise integriert werden und dort besser überleben, wenn das Gehirn sich in einem Körper befindet, in dem größere Muskelgruppen mehrmals die Woche aktiviert werden. Dass sportliche Tätigkeit sich im Alter positiv auf die Erhaltung vor allem des Gedächtnisses auswirkt, konnte der Neurowissenschaftler Arthur Kramer bereits 1999 zeigen: Aerobe, physische Aktivität verringert den Verlust von Nervenzellen und führt bei Senioren zu deutlichen Verbesserungen beim Lösen kognitiver Aufgaben, selbst wenn diese erst jenseits des 60. Lebensjahres mit einem Trainingsprogramm begonnen hatten, das nicht mehr umfasste, als dreimal die Woche bei niedriger Intensität für 45 Minuten zu trainieren. Darüber hinaus zeigten die Probanden vor allem eine Stärkung der exekutiven Funktion des Stirnlappens hinsichtlich ihrer Multitasking-Fähigkeit und Ablenkbarkeit. Sie konnten sich im Vergleich zu einer Kontrollgruppe länger und besser konzentrieren.

Zwar waren die Effekte nicht so groß wie bei Menschen, die sich schon vor dem 50. Lebensjahr regelmäßig sportlich betätigten, aber sie waren deutlich besser als die einer Kontrollgruppe, die kaum sportlich aktiv war. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass es nie zu spät ist, mit regelmäßiger körperlicher Bewegung anzufangen. Allerdings sollte man, bevor man Nordic-Walking-Stöcke oder ein neues Rennrad kauft, mit seinem Hausarzt dahingehend Rücksprache halten, welchen Sport man in welchem Umfang unter Berücksichtigung des individuellen Gesund-

heitszustandes machen darf. Und je untrainierter man ist, desto langsamer sollte man seine Leistungsfähigkeit steigern, sonst endet jeder noch so gut gemeinte sportliche Ansatz schnell in Frustration und schlimmstenfalls sogar mit enormen Kreislaufproblemen.

Wer Sport treibt, wird dafür vielfältig belohnt: Er steigert das eigene Selbstwertgefühl ebenso wie das Selbstbewusstsein und kann besser mit Stress umgehen. Sogar das Risiko, eine Depression zu erleiden, wird durch sportliche Betätigung halbiert! Auch wenn man das Altern des Gehirns nicht verhindern kann, aufschieben kann man es.

Aber es gibt neben den oben genannten Faktoren noch psychologisch-soziale Faktoren, die wichtig sind: Das Alter braucht eine Stimme, in ihrem Kopf, damit sie langfristige eine Altersvorsorge betreiben, aber auch politisch, damit Altersheime genauso menschlich werden, wie wir es von Kitas erwarten und auch am Arbeitsplatz, damit ältere Mitarbeiter hier noch ihre wichtige Rolle optimal spielen können. Auch braucht das Alter Vertrauen – Vertrauen in andere und in sich selbst, denn das Gehirn reguliert seine Leistungsfähigkeit auch an den Erwartungen, die es an sich stellt!

Referenzen:

- <https://www.dasgehirn.info> (Stichwort: Alzheimer)
- Gebhardt, Ulrike, Können neue Medikamente die Demenz besiegen? Spektrum der Wissenschaft, 09/2023.
- Hosseini S, Korte M. How viral infections cause neuronal dysfunction: a focus on the role of microglia and astrocytes. *Biochem Soc Trans.* 2023
- Korte, Martin: Warum wir Vergessen; Gehirn & Geist, Spektrum der Wissenschaft, 09/2018.
- Korte, Martin: Wir sind Gedächtnis: Wie Erinnerungen bestimmen wer wir sind, München (DVA) 2017.
- Korte, Martin: Jung im Kopf: Erstaunliche Einsichten der Gehirnforschung in das Älterwerden, Pantheon, 2014.
- Ludewig S, Herrmann U, Michaelsen-Preusse K, Metzdorf K, Just J, Bold C, Müller UC, Korte M. APP α rescues impaired Ca $^{2+}$ homeostasis in APP- and APLP2-deficient hippocampal neurons. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2021.
- Ludewig S, Korte M. Novel Insights into the Physiological Function of the APP (Gene) Family and Its Proteolytic Fragments in Synaptic Plasticity. *Front Mol Neurosci.* 2017
- Taylor, Kathleen: The fragile brain. The strange, Hopeful Science of Dementia, Oxford, 2016.

KLASSENSITZUNGEN

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften

Entwicklung eines Covid-19-Antikörpers: Vom Start in Insektenzellen bis hin zu klinischen Studien

MAREN SCHUBERT

Institut für Biochemie, Biotechnologie und Bioinformatik, Abteilung
Biotechnologie, Spielmannstraße 7, 38106 Braunschweig

1 Antikörper als Medikamente gegen Covid-19

Die Covid-19-Pandemie wurde ausgelöst von SARS-CoV-2¹

Covid-19 ist eine respiratorische Erkrankung, die durch das Severe acute respiratory syndrome coronavirus type 2 (SARS-CoV-2-Virus) ausgelöst wird. Laut WHO gab es weltweit insgesamt ~770 Millionen bestätigte Infektionen bis März 2024. SARS-CoV-2 trat Ende 2019 das erste Mal auf dem Tiermarkt in Wuhan China auf und wurde vermutlich von einer infizierten Fledermaus auf den ersten Patienten übertragen (Abb. 1 A). Demnach handelt es sich bei SARS-CoV-2 um eine Zoonose, also einer von einem Tier auf einen Menschen (bzw. umgekehrt) übertragbare Krankheit. Laut dem *International Livestock Research Institute* sind etwa 60% aller menschlichen Krankheiten Zoonosen. Zu den zoonotischen Pathogenen gehören neben SARS-CoV-2 unter anderem auch HIV, Borreliose, Vogelgrippe oder das West-Nil-Virus. Zukünftig wird durch die verstärkte Nachfrage nach tierischen Produkten und dem Klimawandel von einem weiteren Anstieg von Zoonosen ausgegangen².

Das SARS-CoV-2-Virus (Abb. 1 B) gehört zu den membranumhüllten mRNA-Viren mit einem Durchmesser von ca. 140 nm und den typischen Spike-Proteinen auf der Oberfläche. Auf dem ~30 kbp großem mRNA-Genom sind nicht strukturelle Proteine zur mRNA-Replikation codiert, sowie vier strukturelle Proteine: Das Nukleo(N)-Protein, welches das Virusgenom bindet, das Envelope(E)-Protein, welches zusammen mit dem Membrane(M)-Protein für die Bildung von Viruspartikeln essentiell ist. Das vierte Protein ist das Corona-typische Spike-Protein, welches über seine Rezeptor Bindungsdomäne (RBD) auf der S1-Untereinheit an den Rezeptor der Wirtszellen bindet, dem Angiotensin-konvertierendes Enzym 2 (ACE2). Die S2- Untereinheit des Spike-Proteins vermittelt danach die Fusion von Virushülle und Zellmembran und ermöglicht das Eindringen des Virus in die Zelle. Hier wird die mRNA abgelesen, vervielfältigt und in neue

SARS-CoV-2-Viren verpackt, die dann wiederum neue Zellen infizieren und zu einer Verbreitung der Infektion sorgen.

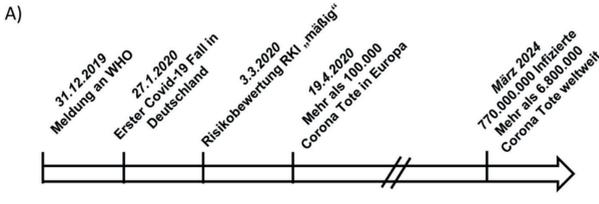


Abb. 1 A. Zeitlicher Verlauf der Covid-19-Pandemie.

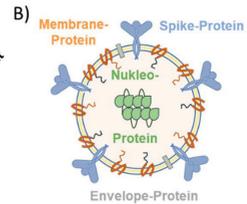


Abb. 1 B. Schema des SARS-CoV-2-Virus.

Antikörper sind ein wichtiger Teil unseres Immunsystems³

Antikörper sind Proteine, die als Teil der Immunabwehr gebildet werden um eindringende Pathogene zu erkennen, zu markieren und zu neutralisieren (Abb. 2 A). Sie gehören zu der sogenannten adaptiven oder spezifischen Immunantwort, dem evolutionär jüngeren Teil des Immunsystems.

Nach Eindringen eines Pathogens wird dieses aber zunächst einmal durch die sogenannte angeborene oder auch unspezifische Immunantwort in Schach gehalten. Zu dieser gehören unter anderem Zellen wie Makrophagen und Granulozyten, die Erreger über allgemeine Pathogen assoziierte molekulare Muster z. B. bakterielle Lipopolysaccharide erkennen und phagozytieren („aufessen“) oder durch die Freisetzung von Granula unschädlich machen.

Die angeborene Immunantwort kann einen großen Teil der verschiedenen Pathogene beseitigen, welche uns täglich bedrohen. Einige Krankheitserreger haben aber ausgefeilte Strategien entwickelt, um ihr zu entkommen. Hier greift die antigenabhängige Immunantwort, die nach Erstkontakt mit einem Krankheitserreger jedoch erst etwa 7–14 Tage zur Ausprägung benötigt. Die Bildung von Antikörpern spielt hier eine zentrale Rolle. Antikörper erkennen und binden an ganz spezifische Regionen, sogenannte Epitope, auf den Krankheitserregern. Damit der Mensch tatsächlich gegen nahezu jeden Krankheitserreger mehrere passende und möglichst effektive Antikörper bilden kann, besitzt er ein Repertoire von ca. 250 Millionen verschiedenen Antikörpern. Diese Vielfalt entsteht durch Genkombinationen und durchläuft eine stringente Selektion. Dabei wird verhindert, dass Antikörper gebildet werden, die körpereigene Epitope erkennen, was zu Autoimmunerkrankungen führen könnte.

Aufgrund der zufälligen Rekombination der DNA für die Antigenbindungsstelle besitzt ein Mensch also in der Regel schon bereits einige B-Zellen, welche einen

Antikörper produzieren, der bisher unbekanntem Krankheitserreger erkennt – sogar schon bevor es zum Kontakt mit dem Pathogen oder auch einer Impfung kam. Diese wenigen Antikörper sind anfangs jedoch noch wenig effektiv und in geringer Menge vorhanden. Sie müssen über die sogenannten somatischen Hypermutationen weiter gereift werden, wodurch die Bindungsstärke an ihr Epitop um das bis zu 1000-Fache ansteigen kann. B-Zellen, die solche gereiften Antikörper produzieren, werden anschließend vermehrt, differenziert und produzieren als Plasmazelle ausreichend Antikörper, um die Pathogene effektiv zu bekämpfen. Diese Reifung und Vervielfältigung dauert jedoch 7–14 Tage, in welchen der infizierte Mensch zur Verteidigung noch alleine auf das angeborene Immunsystem angewiesen ist.

Weiterhin differenzieren aber gereifte B-Zellen auch zu sogenannten Gedächtniszellen aus. Gedächtniszellen können bei erneutem Kontakt mit einem Pathogen deutlich schneller reagieren und sorgen für die Produktion von bereits optimierten, effektiven Antikörpern in ausreichenden Mengen – im optimalen Fall bevor der Mensch überhaupt Symptome einer erneuten Infektion bekommt (Abb. 2 B). Auf diesem Prinzip beruht auch die Impfung, die einen Erstkontakt vortäuscht und so u. a. für die Bildung von effektiven Antikörpern bereits vor Kontakt mit dem realen Krankheitserreger sorgt. Gedächtniszellen können in einigen Fällen (zum Beispiel Masern, Windpocken oder Röteln) ohne weitere Auffrischungsimpfung ein Leben lang stabil bleiben und zum Beispiel vor einer weiteren Erkrankung schützen.

Bei Covid-19 ist das jedoch leider nicht der Fall, hier reichte der initiale Impfschutz nur etwa ein Jahr, was allerdings auch an den verschiedenen dauernd neu entstehenden Varianten liegt⁴.

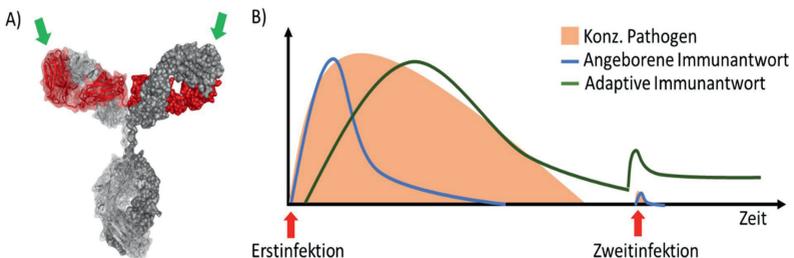


Abb. 2 A. Molekulare Struktur eines Antikörpers, einem Dihomotetramer aus insgesamt vier Polypeptidketten: In Rot die leichten Ketten, in Grau die schweren Ketten. Die Bindung erfolgt an den variablen Regionen der leichten und schweren Ketten (s. grüne Pfeile).

Abb. 2 B. Schematischer zeitlicher Verlauf einer Pathogeninfektion und die entsprechende Antwort des angeborenen und des adaptiven Immunsystems.

Antikörper als Medikamente gegen Covid-19

Antikörper werden, wie unter 1.2 erwähnt, vom Menschen selbst als Reaktion auf eine Infektion oder Impfung gebildet. Bei Erstkontakt ohne effiziente vorhergehende Impfung oder bei Menschen mit geschwächtem Immunsystem (beispielsweise durch eine Chemotherapie), erfolgt die Bildung von effektiven Antikörpern jedoch möglicherweise zu spät und der Mensch kann durch Covid-19 sterben, bevor er selbst genügend Antikörper bilden kann. Folglich kann eine rechtzeitige Gabe von neutralisierenden, gereiften Antikörpern als Medikament erfolgreich gegen Covid-19 eingesetzt werden und schwere Verläufe sowie Todesfälle verhindern. Nebenwirkungen sind bei einer Therapie mit humanen Antikörpern erwartungsmäßig sehr gering, da es sich um körpereigene Proteine handelt. Fast ausschließlich die Möglichkeit einer Kreuzreaktivität zu menschlichen Proteinen stellt eine mögliche Quelle von Nebenwirkungen dar, die aber im Vorfeld bereits über Bindungsstudien z. B. auf histologischen Kryoschnitten weitgehend ausgeschlossen werden kann.

2 Phagen Display zur Gewinnung von humanen, neutralisierenden Antikörpern⁵

Antikörper wurden bereits seit 1890 von Emil von Behring als Medikament eingesetzt, ohne das überhaupt bekannt war, dass es sich um Antikörper handelte. Er nutzte hierzu mit Diphtherie-Toxin-immunisierte Pferde, deren Serum er Diphtherie-infizierten Menschen verabreichte und so viele Leben retten konnte. Heutzutage gibt es weiter ausgereifte Möglichkeiten, Antikörper herzustellen, die nicht nur menschlich, sondern auch Sequenz-definiert sind. Hierdurch werden Reaktionen des Immunsystems gegenüber tierischen Antikörpern ausgeschlossen, die Qualität ist nicht mehr von der Charge abhängig und es können endlose Mengen hergestellt werden und das, ohne Tierwohl zu gefährden.

Die Methode der Wahl ist hierfür das sogenannte Phagendisplay (Abb. 3)⁵. Hierfür werden modifizierte Phagen eingesetzt, die sowohl die menschliche genetische Information für einen Antikörper beinhalten als auch den passenden Antikörper (bzw. die bindende Domäne des Antikörpers) auf der Oberfläche tragen. Diese Kopplung von Genotyp und Phänotyp ist entscheidend für die Methode. Phagenbibliotheken mit $\sim 10^{10}$ unterschiedlichen Phagen⁶, ergo unterschiedlichen Antikörpern, kommen zum Einsatz. Besonders effektiv können neutralisierende Antikörper aus sogenannten Immunbibliotheken gewonnen werden, welche mit Antikörper-Gensequenzen von immunisierten Menschen hergestellt werden. Diese Antikörper haben also schon die Reifung durchlaufen und versprechen daher eine höhere Effizienz als Antikörper, die aus einer „naiven“ Bibliothek gewonnen wurden (d. h. die Spender hatten noch keinen Kontakt mit dem Zielpathogen).

Für das klassische genannte „Panning“ wird nun die Antikörper-präsentierende Phagenbibliothek mit dem immobilisiertem Zielprotein inkubiert, welches an einer Gefäßoberfläche verankert ist. Phagen mit passendem Antikörperfragment können das Zielprotein binden und werden dadurch festgehalten, alle anderen Phagen werden gewaschen. Die gebundenen Phagen werden danach eluiert und in E.coli wieder vermehrt. Mit dieser angereicherten Phagen-Bibliothek werden weitere 2–3 Runden des Panning-Prozesses durchgeführt, bevor anschließend im ELISA (Enzyme-linked Immunosorbent Assay) einzelne Klone auf Bindung überprüft werden. Die gefundenen Antikörper-Klone können nun sequenziert werden und als vollständiger Antikörper umformatiert und produziert werden. Eine Übersicht des Phagendisplay Pannings ist in Abb. 3 gezeigt.

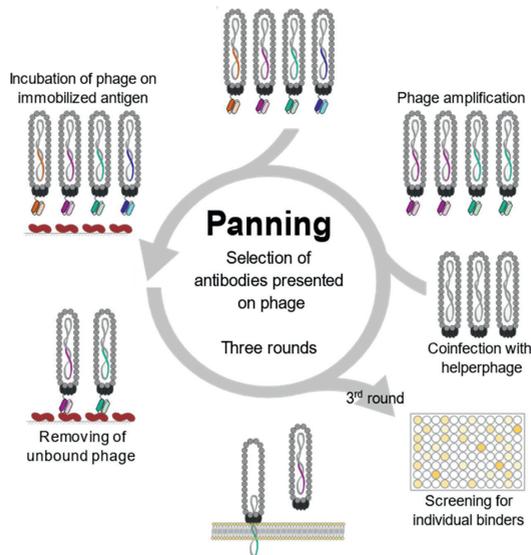


Abb. 3: Übersicht über das Phagendisplay Panning⁵.

Mittels des Phagendisplay-Pannings konnte die Abteilung Biotechnologie der TU Braunschweig und ihre Ausgründung, die auch in Braunschweig ansässige Biotechnologiefirma YUMAB, bereits über 1000 unterschiedliche Antikörperfragmente identifizieren, die an das Spike-Protein von SARS-CoV-2 binden und potentiell SARS-CoV-2-Viren neutralisieren. Hierzu wurden sowohl naive als auch Immunbibliotheken verwendet^{7,8}. Vorteil von naiven Bibliotheken ist jedoch die sofortige Verfügbarkeit, d. h. es musste nicht erst auf genesene Patienten gewartet werden, die ihr Blut und damit ihre Antikörpersequenzen spendeten. Die ersten validierten Spike-Protein-bindenden Antikörper waren daher bereits drei Wochen nach Produktion des Spike Proteins verfügbar⁷.

3 Das Insektenzellproduktionssystem beschleunigte die Entwicklung der Antikörper

Insektenzellen konnten das SARS-CoV-2-Spike-Protein produzieren

Insektenzellen werden bereits seit den 1980-ern als Produktionssystem für rekombinante Proteine genutzt, allerdings bisher zumeist in Verbindung mit einem baculoviralen System. Dieses ist gut etabliert und führt zu sehr hohen Ausbeuten an Protein⁹. Allerdings hat es auch Nachteile. Unter anderem handelt sich um ein lytisches System, die Zellvitalität sinkt somit drastisch im Laufe der Produktion. Weiterhin dauert es mindestens 4 Wochen, bevor ein Protein aufgereinigt werden kann. Nachteilig für die Produktion von Virus-ähnlichen Partikeln (VLPs) ist auch die Verunreinigung mit Baculovirus, da die Produktion von Baculovirus und baculoviralem Protein nicht von der Produktion des VLPs getrennt werden kann.¹⁰

Ein neuerer Ansatz ist unsere Plasmid-basierte Methode (Abb. 4 A)¹¹. Hier wird – wie auch in Säugetierzellen üblich – ein Plasmid mit dem Gen für das Zielprotein in die Insektenzelle geschleust. Die Zelle bleibt hierbei vital, es werden keine viralen Nebenprodukte produziert und bereits nach etwa 96 Stunden kann das Protein oder VLP aufgereinigt werden. Da immer eine große Anzahl von Plasmiden gleichzeitig in die Zelle aufgenommen wird, können auch mehrere Proteine gleichzeitig exprimiert werden, wie es zum Beispiel für SARS-CoV-2 VLPs nötig ist.

Während der Corona-Pandemie war das Insektenzellsystem von entscheidendem Vorteil, da die Produktion und Ausbeute von Spike-Protein nur hier und nicht in den Säugetierzellen (Expi293F) funktionierte. Nur durch die schnelle Produktion in Insektenzellen konnten wir qualitativ hochwertiges Spike-Protein für die schnelle Antikörperselektion einsetzen (Abb. 4 B).

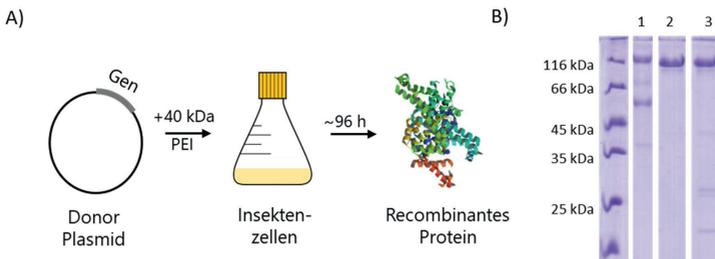


Abb. 4 A. Übersicht über unser Plasmid-basiertes Produktionssystem in Insektenzellen.

Abb. 4 B. Denaturierende Gel-Elektrophorese (SDS-PAGE), um die Qualität des Spike-Proteins zu zeigen. In der Spalte 1 handelt es sich um kommerziell erworbenes Spike-Protein, in den Reihen 2 und 3 um in Haus produziertes Spike-Protein von zwei verschiedenen Chargen. Erwartet wäre eine einzelne Bande bei ca. 130 kDa, zusätzliche Banden wie sehr deutlich in Reihe 1 zeigen Kontaminationen oder Abbauprodukte¹¹. kDa: Kilodalton, PEI: Polyethylenimin.

VLPs aus Insektenzellen zur Untersuchung neutralisierender Antikörper

Durch das Phagendisplay konnten erfolgreich mehr als 1000 verschiedene Spike-bindende Antikörper identifiziert werden. Es aber nicht möglich, alle diese Antikörper unter den notwendigen hohen Sicherheitsvorkehrungen (BSL3-Labore) mit realen SARS-CoV-2-Viren zu testen und zu vergleichen. Dafür ist die Kapazität in den BSL3-Laboren nicht ausreichend.

Um die Antikörper dennoch unter möglichst authentischen Bedingungen auf ihre Wirksamkeit zu selektieren, wären VLPs geeignet gewesen. VLPs stellen die Virushülle mit allen Merkmalen realer SARS-CoV-2-Viren dar, beinhalten aber keinerlei virale genetische Information. Sie können sich daher nicht vervielfältigen und keine Erkrankung erzeugen, und unterliegen somit auch nicht den hohen Sicherheitsvorkehrungen wie die realen Viren¹².

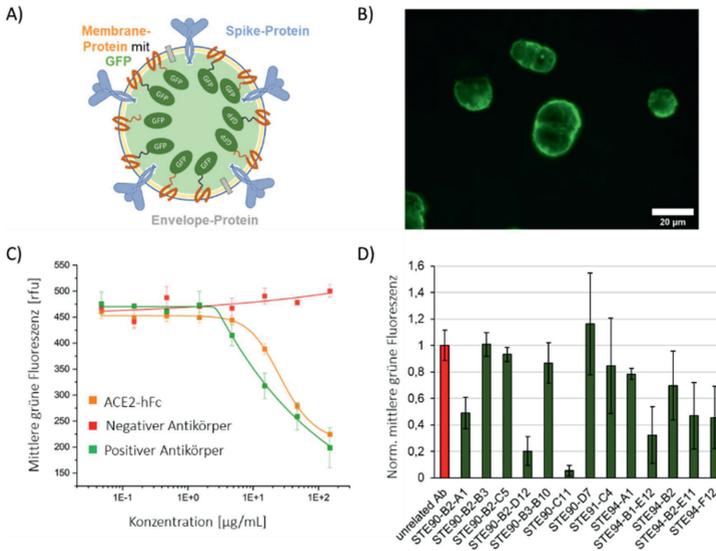


Abb. 5 A. Schema von SARS-CoV-2-VLPs.

Abb. 5 B. Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von grünen SARS-CoV-2-VLP, die an ACE2 positive Säugerzellen gebunden haben.

Abb. 5 C. Mittlere grüne Fluoreszenz von ACE2 positiven Säugerzellen, die mit den grünen SARS-CoV-2-VLPs und zusätzlich mit der angegebenen Konzentration von löslichem ACE2-Rezeptor (gelb), einem nicht Spike-bindenden Antikörper (rot) und einem guten Antikörperkandidaten (grün) inkubiert wurden.

Abb. 5 D. Normalisierte mittlere gemessene grüne Fluoreszenz, die unter Zugabe von 150 µg/mL verschiedener Antikörperkandidaten erreicht wurde. Normalisiert wurde hierbei auf einen Antikörper, der nicht an das Spike-Protein binden kann und somit keine neutralisierende Wirkung hat (roter Balken). Je geringer daher die normalisierte grüne Fluoreszenz war, eine desto bessere Neutralisierungseffizienz zeigte der entsprechende Antikörper.¹⁴

Im Falle von SARS-CoV-2-Viren wurde ermittelt, dass die gleichzeitige Expression von M- und E-Protein die Produktion von VLPs ermöglicht¹³. Um die komplette Virushülle nachzuahmen, wurde zusätzlich das Spike-Protein produziert. Da das Ziel eine Messung mit Zellen im Zytometer war, wurde das M-Protein intraviral auf genetischer Ebene mit eGFP gekoppelt, einem grün fluoreszierendem Marker-Protein. Das oben beschriebene Expressionssystem in Insektenzellen eignete sich hervorragend, um solche SARS-CoV-2-VLPs zu produzieren (Abb. 5 A).¹⁴

Diese VLPs binden durch das Spike-Protein an Zellen, welche einen ACE2-Rezeptor auf der Oberfläche tragen, wie es auch SARS-CoV-2-Viren tun würden. Findet diese Bindung statt, markieren die GFP-positiven VLPs die Zellen und sie erscheinen unter dem Mikroskop grün (Abb. 5 B).¹⁴

Wird nun jedoch ein Antikörper hinzugegeben, der in der Lage ist diese Bindung zu blockieren, also die VLPs zu neutralisieren, nimmt die beobachtete grüne Fluoreszenz in Abhängigkeit der Konzentration und der Effizienz des Antikörpers ab. Dies kann im Zytometer gemessen werden (Abb. 5 C und D).¹⁴

Auf diese Weise können nun die unterschiedlichen Antikörper unter geringem Aufwand und auch außerhalb eines Hochsicherheitslabors auf ihre Neutralisationseffizienz eingeschätzt werden. Die vielversprechendsten Kandidaten wurden im Weiteren am Helmholtz Zentrum für Infektionsforschung (HZI) im BSL3-Labor mit realem SARS-CoV-2-Virus getestet. Hierbei wurde die zuvor im VLP-Assay bestimmte Rangfolge der Antikörperkandidaten weitgehend bestätigt.

4 Aus der Universität bis zum Patienten

Die Bestätigung, dass ein Antikörper effizient das SARS-CoV-2-Virus neutralisieren kann, ist nur der erste Schritt, um ihn tatsächlich als Medikament für Patienten zu entwickeln. Unser im weiteren Verlauf als bester Kandidat angesehene Antikörper, genannt COR-101, unterlief nach dem Test mit realem SARS-CoV-2-Virus zunächst noch Stabilitätstests unter verschiedenen Bedingungen. Analysen auf Kryoschnitten zeigten keine unerwünschte Kreuzreaktivität zu menschlichen Proteinen auf. Erste *in vivo*-Versuche in Hamstern und in den später verfügbaren Mausmodellen verifizierten die antivirale Wirkung von COR-101 im lebenden Organismus. Weiterhin musste COR-101 nach Medikamentenstandards („good manufacturing practice“, GMP) in ausreichenden Mengen produziert werden, um in klinischen Studien zugelassen zu werden.¹⁵

Diese Schritte konnten zum großen Teil nicht mehr an der TU Braunschweig durchgeführt werden, sondern wurden in enger Kooperation mit verschiedenen Partnern durchgeführt. Besonders lokale Kooperationen mit der YUMAB, dem

HZI und dem Frauenhofer ITEM ermöglichten es, COR-101 unter Pandemiebedingungen in Rekordzeit bis in die klinischen Studien zu bringen. Schließlich konnte eine Ausgründung der YUMAB, die CORAT Therapeutics, COR-101 im April 2021 dem ersten Patienten verabreichen. Die Wirksamkeit bei mittleren und schweren Verläufen deutete sich bereits in dieser ersten Studie an.

Mit dem Auftreten der Omikron-Variante ließ die Wirksamkeit – wie bei den meisten anderen entwickelten Antikörperkandidaten¹⁶ – jedoch nach, da COR-101 diese Variante nicht mehr bindet.

5 Was können wir lernen für die nächste Pandemie?

Covid-19 hat viele Todesopfer gefordert, aber Antikörperpräparate konnten hier tatsächlich Menschenleben retten. Selbstverständlich ist eine wirksame Impfung, die u. a. zur Bildung körpereigener Antikörper führt, am effizientesten, um Todesfälle zu vermeiden. Trotz verfügbarer Impfung und auch abhängig von deren Effizienz wird es aber immer Fälle geben, in denen eine Impfung eben nicht zu dem gewünschten Schutz führt, besonders bei Menschen mit geschwächtem Immunsystem. Hier werden Medikamente wie Antikörper benötigt. Daher sollte im Falle der nächsten Pandemie sowohl die Forschung an Impfstoffen als auch die Forschung an Medikamenten parallel vorangetrieben werden.

Selbstverständlich war die Abteilung Biotechnologie weltweit nicht die einzige Gruppe, die einen effizienten Antikörper entwickelt hat. Auch hier ist es aber wichtig, nicht nur die Entwicklung eines einzigen Antikörpers voranzutreiben, sondern immer mehrere Kandidaten bis in die Klinik zu fördern. Nur so kann sichergestellt werden, dass auch nach dem Auftreten von verschiedenen Varianten höhere Chancen bestehen, immer noch einen wirksamen Antikörper zur Verfügung zu haben.

Positiv ist anzumerken, dass Covid-19 deutlich gezeigt hat, wie schnell ein Antikörper durchaus an einem entsprechend ausgerichteten Forschungsschwerpunkt wie Braunschweig entwickelt werden kann. Klassischer Weise dauert es etwa 8 bis 10 Jahre, bevor ein Antikörper Patienten verabreicht wird, was im Falle einer Pandemie natürlich viel zu langsam ist. COR-101 konnte tatsächlich bereits nach nur fast einem Jahr Entwicklung dem ersten Patienten verabreicht werden. Unter noch besseren Voraussetzungen, wie unter anderem vorbereiteten Zusammenarbeitsmodellen aller relevanten Partner und schnellerer finanzieller Unterstützung, wäre eine weitere Verkürzung auf unter sechs Monaten sehr realistisch. Dies würde bei der unabwendbar kommenden nächsten Pandemie ganz konkret Menschenleben retten.

Literatur

- (1) Hu, B.; Guo, H.; Zhou, P.; Shi, Z.-L. Characteristics of SARS-CoV-2 and COVID-19. *Nat. Rev. Microbiol.* **2021**, *19* (3), 141–154. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00459-7>.
- (2) Jánová, E. Emerging and Threatening Vector-Borne Zoonoses in the World and in Europe: A Brief Update. *Pathog. Glob. Health* **2019**, *113* (2), 49–57. <https://doi.org/10.1080/20477724.2019.1598127>.
- (3) Murphy, K.; Weaver, C.; Berg, L.; Janeway, C. *Janeway's Immunobiology*, 10th edition.; W.W. Norton and Company: New York, NY, 2022.
- (4) Mungmunpuntipantip, R.; Wiwanitkit, V. Expected Response to the Additional Fifth Dose of COVID-19 Vaccine. *Int. J. Prev. Med.* **2023**, *14*, 112. https://doi.org/10.4103/ijpvm.ijpvm_146_22.
- (5) Steinke, S.; Roth, K. D. R.; Ruschig, M.; Langreder, N.; Polten, S.; Schneider, K.-T.; Ballmann, R.; Russo, G.; Zilkens, K. J. K.; Schubert, M.; Bertoglio, F.; Hust, M. Antibody Selection via Phage Display in Microtiter Plates. *Methods Mol. Biol. Clifton NJ* **2023**, *2702*, 247–260. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3381-6_12.
- (6) Kügler, J.; Wilke, S.; Meier, D.; Tomszak, F.; Frenzel, A.; Schirrmann, T.; Dübel, S.; Garritsen, H.; Hock, B.; Toleikis, L.; Schütte, M.; Hust, M. Generation and Analysis of the Improved Human HAL9/10 Antibody Phage Display Libraries. *BMC Biotechnol.* **2015**, *15* (1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12896-015-0125-0>.
- (7) Bertoglio, F.; Meier, D.; Langreder, N.; Steinke, S.; Rand, U.; Simonelli, L.; Heine, P. A.; Ballmann, R.; Schneider, K.-T.; Roth, K. D. R.; Ruschig, M.; Riese, P.; Eschke, K.; Kim, Y.; Schäckermann, D.; Pedotti, M.; Kuhn, P.; Zock-Emmenthal, S.; Wöhrle, J.; Kilb, N.; Herz, T.; Becker, M.; Grasshoff, M.; Wenzel, E. V.; Russo, G.; Kröger, A.; Brunotte, L.; Ludwig, S.; Fühner, V.; Krämer, S. D.; Dübel, S.; Varani, L.; Roth, G.; Čičin-Šain, L.; Schubert, M.; Hust, M. SARS-CoV-2 Neutralizing Human Recombinant Antibodies Selected from Pre-Pandemic Healthy Donors Binding at RBD-ACE2 Interface. *Nat. Commun.* **2021**, *12* (1), 1577. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21609-2>.
- (8) Bertoglio, F.; Fühner, V.; Ruschig, M.; Heine, P. A.; Abassi, L.; Klünemann, T.; Rand, U.; Meier, D.; Langreder, N.; Steinke, S.; Ballmann, R.; Schneider, K.-T.; Roth, K. D. R.; Kuhn, P.; Riese, P.; Schäckermann, D.; Korn, J.; Koch, A.; Chaudhry, M. Z.; Eschke, K.; Kim, Y.; Zock-Emmenthal, S.; Becker, M.; Scholz, M.; Moreira, G. M. S. G.; Wenzel, E. V.; Russo, G.; Garritsen, H. S. P.; Casu, S.; Gerstner, A.; Roth, G.; Adler, J.; Trimpert, J.; Herrmann, A.; Schirrmann, T.; Dübel, S.; Frenzel, A.; Van den Heuvel, J.; Čičin-Šain, L.; Schubert, M.; Hust, M. A SARS-CoV-2 Neutralizing Antibody Selected from COVID-19 Patients Binds to the ACE2-RBD Interface and Is Tolerant to Most Known RBD Mutations. *Cell Rep.* **2021**, *36* (4), 109433. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2021.109433>.

- (9) Felberbaum, R. S. The Baculovirus Expression Vector System: A Commercial Manufacturing Platform for Viral Vaccines and Gene Therapy Vectors. *Bio-technol. J.* **2015**, *10* (5), 702–714. <https://doi.org/10.1002/biot.201400438>.
- (10) Liu, F.; Wu, X.; Li, L.; Liu, Z.; Wang, Z. Use of Baculovirus Expression System for Generation of Virus-like Particles: Successes and Challenges. *Protein Expr. Purif.* **2013**, *90* (2), 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.pep.2013.05.009>.
- (11) Korn, J.; Schäckermann, D.; Kirmann, T.; Bertoglio, F.; Steinke, S.; Heisig, J.; Ruschig, M.; Rojas, G.; Langreder, N.; Wenzel, E. V.; Roth, K. D. R.; Becker, M.; Meier, D.; van den Heuvel, J.; Hust, M.; Dübel, S.; Schubert, M. Baculovirus-Free Insect Cell Expression System for High Yield Antibody and Antigen Production. *Sci. Rep.* **2020**, *10* (1), 21393. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-78425-9>.
- (12) Vicente, T.; Roldão, A.; Peixoto, C.; Carrondo, M. J. T.; Alves, P. M. Large-Scale Production and Purification of VLP-Based Vaccines. *J. Invertebr. Pathol.* **2011**, *107 Suppl*, S42–48. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2011.05.004>.
- (13) Xu, R.; Shi, M.; Li, J.; Song, P.; Li, N. Construction of SARS-CoV-2 Virus-Like Particles by Mammalian Expression System. *Front. Bioeng. Biotechnol.* **2020**, *8*, 862. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00862>.
- (14) Jaron, M.; Lehky, M.; Zarà, M.; Zaydowicz, C. N.; Läk, A.; Ballmann, R.; Heine, P. A.; Wenzel, E. V.; Schneider, K.-T.; Bertoglio, F.; Kempster, S.; Köster, R. W.; Barbieri, S. S.; van den Heuvel, J.; Hust, M.; Dübel, S.; Schubert, M. Baculovirus-Free SARS-CoV-2 Virus-like Particle Production in Insect Cells for Rapid Neutralization Assessment. *Viruses* **2022**, *14* (10), 2087. <https://doi.org/10.3390/v14102087>.
- (15) Dübel, S.; Herrmann, A.; Schirrmann, T.; Frenzel, A.; Hust, M. COR-101, ein menschlicher Antikörper gegen COVID-19. *Biospektrum Z. Ges. Biol. Chem. GBCH Ver. Allg. Angew. Mikrobiol. VAAM* **2021**, *27* (1), 46–48. <https://doi.org/10.1007/s12268-021-1512-x>.
- (16) Chenchula, S.; Amereni, K. C.; Ghanta, M. K.; Padmavathi, R.; Chandra, M. B.; Adusumilli, M. B.; Chavan, M.; Mudda, S.; Gupta, R.; Lakhawat, B. Clinical Virology and Effect of Covid-19 Vaccination and Monoclonal Antibodies against Highly Infectious SARS- CoV-2 Omicron Sub Variant BF.7 (BA.5.2.1.7): A Systematic Review. *Virology* **2023**, *584*, 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.virol.2023.04.007>.

Digitaler Beton – Kombinierte additive Fertigung für die Herstellung bewehrter Betonbauteile

NIKLAS FREUND, DIRK LOWKE

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), Technische Universität Braunschweig, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig
Department of Materials Engineering, Technische Universität München, Freisinger Landstraße 52, 85748 Garching b. München

1 Einleitung

Beton ist nach Wasser der am meisten vom Menschen genutzte Stoff auf der Welt [1]. Grund dafür sind unter anderem seine auszeichnenden Eigenschaften in Bezug auf die Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit, Feuerbeständigkeit sowie seine leichte und preiswerte Verfügbarkeit [2]. Die Herstellung von Betonbauteilen ist hierbei meistens mit dem Einsatz von Systemschalungen verbunden. Die Geometrie betonierter Bauteile basiert dementsprechend oft auf einfach zu schalenden monolithischen Strukturen mit konstantem Querschnitt, die oft mehr Material enthalten, als aus konstruktiver Sicht erforderlich wäre. Diese Materialverschwendung resultiert in der Regel aus Bestrebungen zur Kostenoptimierung, da die Herstellung komplex geformter Bauteile mit einem hohen manuellen Herstellungsaufwand und dem kostenintensiven Einsatz von Spezialschalungen verbunden ist [1].

Die heutige Bauindustrie steht jedoch vor einer Vielzahl von Herausforderungen, darunter die Notwendigkeit der Reduzierung der CO₂-Emissionen und ein zunehmender Fachkräftemangel bei gleichzeitig steigendem Bedarf an Infrastruktur und Wohnungsbau. Diese Herausforderungen zeigen auf, dass ein Umdenken in der Baubranche nicht nur wünschenswert, sondern dringend notwendig ist. Ein Schlüssel zur Lösung dieser Probleme könnte im Einsatz digitaler Fertigungstechnologien liegen, wie z. B. der additiven Fertigung von Beton, umgangssprachlich auch als Beton-3D-Druck bekannt. Die additive Fertigung ermöglicht die automatisierte und schalungsfreie Herstellung geometrisch komplexer Bauteile. So können materialeffiziente Konstruktionen realisiert werden, bei denen Material nur noch an solchen Stellen aufgebracht wird, an denen es auch strukturell benötigt wird, siehe Abbildung 1 (links). Die additive Fertigung im Bauwesen eröffnet damit nicht nur neue architektonische Möglichkeiten, sondern ermöglicht auch einen ressourcenschonenden und effizienten Bauablauf, der eine geschlossene digitale Prozesskette von der digitalen Planung bis zur digitalen Fertigung nutzt.

Die bisher realisierten Bau- und Forschungsprojekte adressieren eine Vielzahl an Themen, wie dem optimierten Bauteildesign [3], dem nachhaltigen Materialdesign [4], der Funktionsintegration (z. B. hinsichtlich Akustik und Dämmung [5]), der Bewehrungsintegration [6] sowie der Automatisierung der Bauprozesse [7]. Die hergestellten Demonstrationsobjekte reichen dabei von einzelnen exemplarischen Bauteilen, über vollständige Infrastrukturbauwerke, wie Brücken und Küstenschutzwände, bis hin zu gedruckten Häusern, siehe Abbildung 1 (rechts).



Abb. 2. Links: Topologieoptimiertes, digital an der ETH Zürich gefertigtes Deckenelement (aus [8]); Rechts: Erstes 3D-gedrucktes Haus in Deutschland (Bildquelle: www.baunetz.de).

2 Klassifizierung Additiver Fertigungsverfahren mit Beton

Additive Fertigungsverfahren basieren auf der schichtweisen Herstellung eines zuvor in einem 3D-Modell geplanten Bauteils. Im Rahmen der Additiven Fertigung zementbasierter Baustoffe werden zwei Hauptgruppen unterschieden: Selektives Binden im Partikelbett (Partikelbettverfahren) und Ablegende Verfahren. Beim Partikelbettverfahren wird in einem definierten Bauraum ein Partikelbett schichtweise ausgebracht und selektiv aktiviert. Im Rahmen der ablegenden Verfahren wird das Material frei im Raum ohne die stützende Wirkung eines Partikelbetts appliziert. siehe Abbildung 2.

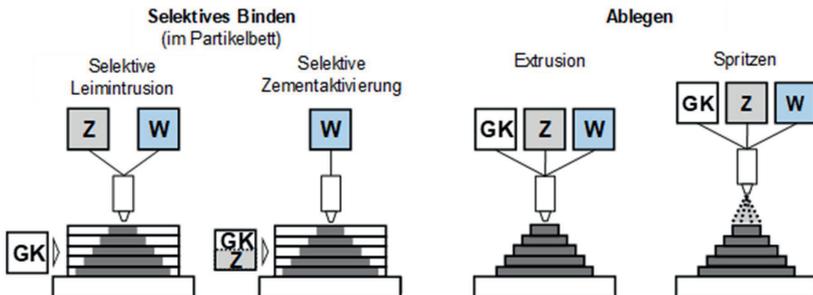


Abb. 3. Klassifizierung additiver Fertigungsverfahren zementbasierter Baustoffe (nach [9–11]).

Innerhalb der Partikelbettverfahren können die zwei Prozesse Selektive Leimintrusion und Selektive Zementaktivierung unterschieden werden [10]. Bei der **Selektiven Leimintrusion** besteht das Partikelbett aus Gesteinskörnung (GK). Der Bindemittelleim besteht aus Zement (Z) und Wasser (W) und wird mittels Düsen selektiv auf das Partikelbett aufgetragen. Um Bauteile mit ausreichender Festigkeit herstellen zu können, muss der Zementleim anschließend über die gesamte Höhe der Partikelschicht in die Hohlräume zwischen den Partikeln eindringen. Bei der **selektiven Zementaktivierung** besteht das Partikelbett aus einem trockenen Gemisch aus feiner Gesteinskörnung (GK) und Zement (Z). Das Partikelbett (GK+Z) wird lokal aktiviert, indem Wasser (W) aufgesprüht bzw. aufgestrahlt wird und so eine Zementleimmatrix um die Gesteinskörnungspartikel gebildet wird. Die selektive Zementaktivierung zeichnet sich durch den Einsatz eines sehr feinkörnigen Partikelbetts durch eine hohe geometrische Auflösung aus. Die Größe der zu druckenden Bauteile ist jedoch auf die Größe des Partikelbettbaureaums limitiert.

Im Rahmen der ablegenden Verfahren können ebenfalls zwei Prozesse unterschieden werden: Extrusion und Materialspritzen [12]. Bei der **Extrusion** wird der vorgemischte Beton (Z+GK+W) bis zur Düse gepumpt und dort in Strängen an spezifizierten Koordinaten abgelegt. Dies kann ohne Schlauch oder Stützstruktur erfolgen. Die Form des erzeugten Strangs ist hierbei maßgebend durch die Form der Düsenöffnung, die rheologischen Frischbetoneigenschaften und der gewählten Prozessparameter abhängig. Die Auflösung in vertikaler Richtung ist durch die Höhe der aufgebracht Materialstränge bestimmt. Das **Materialspritzen** – wie bspw. das Shotcrete-3D-Printing (SC3DP) [13] – basiert auf dem etablierten und besonders aus dem Bereich des Tunnelbaus und der nachträglichen Verstärkung bekannten Spritzauftrags von Beton. In Analogie zur Extrusion wird das Material über einen Pumpprozess zur Düse gefördert. Hier wird es jedoch mit Luftdruck beschleunigt und somit mit hoher kinetischer Energie und einem definierten Düsenabstand appliziert. Dieses ermöglicht eine höhere geometrische Freiheit bei der Materialapplikation sowie eine gute Verzahnung der abgelegten Schichten. Eine große Herausforderung der ablegenden Verfahren besteht in den widersprüchlichen rheologischen Anforderungen, die an das Material gestellt werden. Durch die auf Pumpen basierte Förderung des Betons bis zur Düse muss das Material zum einen pumpbar sein, d.h. es muss eine niedrige Fließgrenze aufweisen, zum anderen muss das Material jedoch nach Verlassen der Düse eine hohe Formstabilität und somit einen schnellen Strukturaufbau aufweisen, um nicht unter seinem Eigengewicht und dem Gewicht der nachfolgenden Schichten zu kollabieren. Dieses erfordert ein fundamentales Verständnis der vorliegenden Material-Prozess-Interaktion.

3 Bewehrungsintegration in die Additiven Fertigungsprozesse

Die derzeitigen Verfahren der additiven Fertigung mit Beton fokussieren sich hauptsächlich auf das Drucken von unbewehrten Betonstrukturen. Viele Bauanwendungen erfordern jedoch bewehrten Beton, um sowohl Druck- als auch Zugkräfte effektiv abtragen zu können. In der traditionellen Schalungsbauweise lässt sich die Bewehrungsintegration einfach realisieren. Die Bewehrungsstrukturen werden vor dem Betonieren in die Schalung eingelegt und während des Betoniervorgangs vom Beton umschlossen. Durch das Rütteln des integrierten Betons kann ein guter Verbund zwischen Beton und Bewehrung hergestellt werden. Im Gegensatz dazu stellt die Integration von Bewehrung in den Prozess des Beton-3D-Drucks eine komplexere Herausforderung dar, da der automatisierte Beton-3D-Druckprozess mit der Bewehrungsintegration auf der Prozess- und Materialebene zusammengeführt werden muss. Das Ziel ist eine kombinierte additive Fertigung bewehrter Betonbauteile, in welcher der Bewehrungsintegrationsprozess die Automatisierung und die geometrische Freiheit des additiven Fertigungsprozesses nicht beeinträchtigt. Beide Prozesse müssen hierbei aufeinander abgestimmt werden, um die Potenziale der additiven Fertigung effektiv nutzen zu können.

Im Rahmen der Bewehrungsintegration konnten bisher eine Vielzahl verschiedener Strategien erarbeitet werden, die sich wie in Abbildung 3 dargestellt nach Kloft et al. kategorisieren lassen [6].

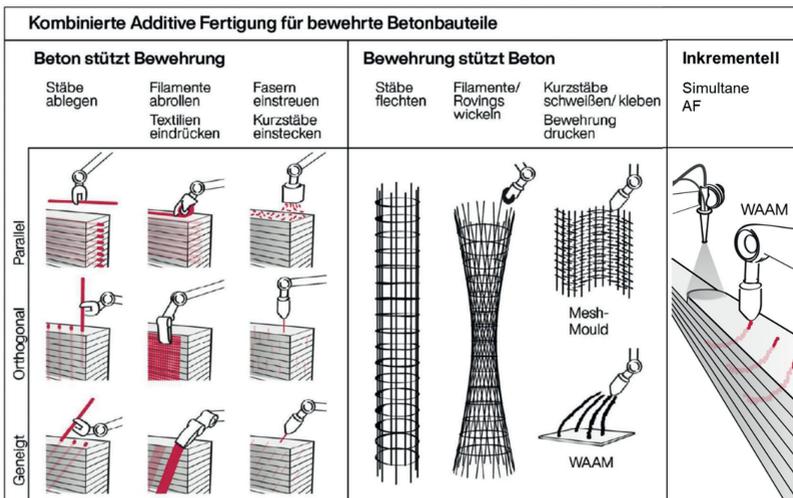


Abb. 4. Strategien zur kombinierten additiven Fertigung für bewehrte Betonbauteile (nach [6]).

Innerhalb der Kategorie „**Beton stützt Bewehrung**“ erfolgt im ersten Schritt das Drucken einer Betonstruktur, welche dann als Basis zur Integration von Bewehrung dient. Die Bewehrung kann hierbei entweder auf die Betonoberfläche oder schichtdurchdringend (gerade oder angewinkelt) integriert werden. Bewehrung, welche nach dem Integrationsprozess freiliegt kann im weiteren Beton-Druckprozess umschlossen werden. Als Bewehrungsmaterial können neben Stahlbewehrung, auch alternative Bewehrungsmaterialien, wie z. B. Carbon- oder Glasfasern eingesetzt werden. Auch Kombinationen verschiedener Bewehrungsstrategien sind möglich, wie beispielsweise eine Kombination aus der schichtdurchdringenden Kurzbewehrungsintegration und der zwischen den Schichten integrierten Interlayerbewehrung, siehe Abbildung 4. Die Bewehrungsintegration erfolgt hierbei über automatisierte Endeffektoren, welche kooperativ mit dem Roboter des Betondruckprozess agieren [14–17].



Abb. 5. Bewehrungsintegration in den Shotcrete-3D-Printing-Prozess aus einer Kombination von Kurzbewehrungsintegration und Interlayerbewehrung (aus [16]).

Bewehrungsstrategien, welche in die Kategorie „**Bewehrung stützt Beton**“ eingeordnet werden können, basieren auf einem vorlaufenden Herstellungsprozess der Bewehrungsstruktur, welche dann im Rahmen des Beton-3D-Druckprozess umschlossen wird. Die Bewehrungsstruktur stützt hierbei in Abhängigkeit der geometrischen Ausführung unterschiedlich stark die applizierte Betonmatrix. Die gefertigten Bewehrungsstrukturen können von händisch geflochtenen Bewehrungskörpern bis hin zu automatisiert gefertigten, freigeformten Bewehrungsstrukturen reichen. Abbildung 5 zeigt die Umschließung eines konventionellen Bewehrungskorbs [18] sowie eines im additiven Metallschutzgasschweißverfahren (WAAM – Wire arc additive manufacturing) im Shotcrete-3D-Printing-Verfahren [19,20].

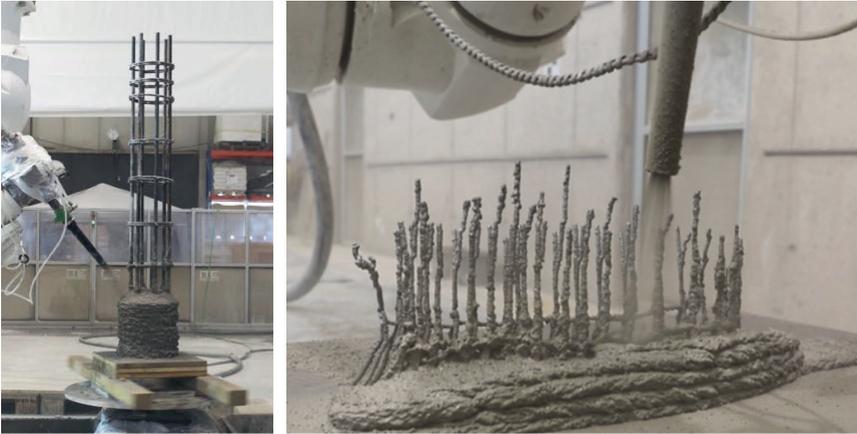


Abb. 7. Integration vorgefertigter Bewehrungsstrukturen im Shotcrete-3D-Printing-Verfahren; Links: Vorgefertigter, konventioneller Bewehrungskorb (aus [21]), Rechts: Mittels additivem Metallschutzgasschweißen vorgefertigte, freigeformte Bewehrungsstruktur (aus [20]).

Die Kategorie „**Inkrementell**“ umfasst die simultane additive Fertigung einer Beton- und Bewehrungsstruktur in einem kombinierten Bewehrungsprozess. Abbildung 6 zeigt das Beispiel einer Kombination des additiven Metallschutzgasschweißens (WAAM) mit der selektiven Leimintrusion. Herausforderung in diesem Verfahren ist die Abstimmung der Prozessgeschwindigkeiten aus Beton- und Stahl-Druckprozess sowie die Entwicklung von Abkühlungsstrategien, um die Wärme des Schweißprozesses und dessen Einfluss auf die Betoneigenschaften zu minimieren. Auch die inkrementelle Fertigung durch das Punktschweißen von kurzen Bewehrungsstäben parallel zum Druckprozess konnte in Kombination mit dem Extrusionsverfahren gezeigt werden [22].



Abb. 6. Kombination eines additiven Metallschutzgasschweißprozesses zur Bewehrungsfertigung und der selektiven Leimintrusion als Beton-3D-Druckverfahren (aus [23]).

Ein entscheidender Aspekt neben der prozesseitigen Integration der Bewehrung ist die Erzielung guter Verbundeigenschaften zwischen Bewehrung und Beton. Nur wenn eine gute Umschließung der Bewehrung mit Beton realisiert werden kann, kann die Bewehrung ihre volle Tragfähigkeit entfalten, die im Rahmen der Bemessung rechnerisch angesetzt wurde. Dabei spielt die Wechselwirkung zwischen dem Integrationsprozess der Bewehrung und dem Beton-Druckprozess eine

maßgebliche Rolle, insbesondere im Hinblick auf die rheologischen Eigenschaften des frischen Betons. Die sich hieraus ergebende Material-Prozess-Interaktion ist somit von hoher Bedeutung und muss bei der Auswahl geeigneter Prozessfenster, wie zum Beispiel dem Zeitpunkt der Bewehrungsintegration sowie bei der Festlegung von Prozessparametern berücksichtigt werden. Die Qualität des resultierenden Verbunds zwischen Bewehrung und Beton kann neben einer mechanischen Beurteilung mittels Auszugsversuchen [24], auch bildgebend durch den Einsatz von Computertomographie (CT) untersucht werden [14,15]. Abbildung 7 zeigt exemplarisch CT-Aufnahmen von Bewehrungsstäben, welche im Rahmen der Kurzbewehrungsintegration mit einer nicht geeigneten Prozessabstimmung (Abbildung 7a) sowie einer auf die rheologischen Betoneigenschaften abgestimmten (rotierenden) Integration (Abbildung 7b) durchgeführt wurden.

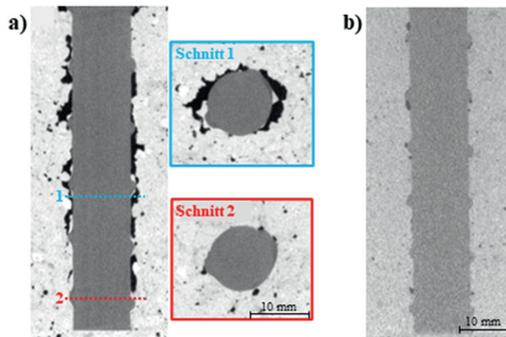


Abb. 8. Computertomographie-Aufnahmen der Verbundzone von Bewehrungsstäben, welche im Rahmen der Kurzbewehrungsintegration a) direkt und b) rotiert integriert wurden (aus [14]).

Die in Abbildung 7a dargestellte Verbundzone resultierte aus dem direkten Einstecken des Bewehrungsstabes in die gedruckte Betonstruktur unmittelbar nach dem Druckvorgang. Aufgrund der steifen Konsistenz des Betons konnte nur im Fußbereich des Bewehrungsstabes eine homogene Verbundzone hergestellt werden (siehe Schnitt 2), der darüber liegende Verbundbereich zeichnet sich durch eine hohe Ansammlung von Lufteinschlüssen aus (siehe Schnitt 1), welches zu einer Minimierung der resultierenden mechanischen Verbundfestigkeit führt. Die in Abbildung 7b dargestellte Verbundzone konnte durch den Einsatz einer rotierenden Integration des Bewehrungsstabes deutlich optimiert werden. Durch die Modifikation des Integrationsprozesses von einer direkten zu einer rotierenden Integration konnte eine homogene Verbundzone ohne die Ansammlung von Lufteinschlüssen erreicht werden. Dies zeigt, dass eine sorgfältige Abstimmung der Material- und Prozessparameter für eine effiziente und qualitativ hochwertige Herstellung von bewehrten Betonbauteilen in der additiven Fertigung unerlässlich ist.

Referenzen

1. Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gramazio, F.; Kohler, M.; Bernhard, M.; Dillenburger, B.; Buchli, J.; Roussel, N.; et al. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Tech Lett* 2016, 1, 67, doi:10.21809/rilemtechlett.2016.16.
2. Krauss, H.-W.; Nolte, N.; Budelmann, H.; Kloft, H.; Lowke, D. *Additive Fertigung mit Beton – Herausforderungen und Lösungswege am Beispiel des SC3DP-Verfahrens*; 20. Internationale Baustofftagung, ibausil 2018, Weimar, 2018.
3. Anton, A.; Reiter, L.; Wangler, T.; Frangez, V.; Flatt, R.J.; Dillenburger, B. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns. *Automation in Construction* 2021, 122, 103467, doi:10.1016/j.autcon.2020.103467.
4. Da Silva, W.; Kaasgaard, M. Green Concrete for Sustainable 3DCP: Developing sustainable mixture design. *Concrete International* 2022, 34–40.
5. Briels, D.; Renz, M.; Nouman, A.S.; Straßer, A.; Hechtl, M.; Dahlenburg, M.; Knychalla, B.; Sonnleitner, P.; Herding, F.; Fleckenstein, J.; et al. Monolithic AM façade: multi-objective parametric design optimization of additively manufactured insulating wall elements. *Front. Built Environ.* 2023, 9, doi:10.3389/fbuil.2023.1286933.
6. Kloft, H.; Empelmann, M.; Hack, N.; Herrmann, E.; Lowke, D. Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing. *Civil Engineering Design* 2020, 2, 131–139, doi:10.1002/cend.202000022.
7. Lachmayer, L.; Böhler, D.; Freund, N.; Mai, I.; Lowke, D.; Raatz, A. Modelling the influence of material and process parameters on Shotcrete 3D Printed strands – cross-section adjustment for automatic robotic manufacturing. *Automation in Construction* 2023, 145, 104626, doi:10.1016/j.autcon.2022.104626.
8. Agustí-Juan, I.; JIPA, A.; Habert, G. Environmental assessment of multi-functional building elements constructed with digital fabrication techniques. *Int J Life Cycle Assess* 2019, 24, 1027–1039, doi:10.1007/s11367-018-1563-4.
9. Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C. *3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen–Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und ...*; ibausil 2015, 2015.
10. Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B. Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research* 2018, 112, 50–65, doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.018.
11. Vasilic, K. Additive Manufacturing with concrete: State of the art. *Construction Printing Technology (CPT worldwide)* 2020.

12. Buswell, R.A.; da Silva, W.L.; Bos, F.P.; Schipper, H.R.; Lowke, D.; Hack, N.; Kloft, H.; Mechtcherine, V.; Wangler, T.; Roussel, N. A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research* 2020, *134*, 106068, doi:10.1016/j.cemconres.2020.106068.
13. Kloft, H.; Krauss, H.-W.; Hack, N.; Herrmann, E.; Neudecker, S.; Varady, P.A.; Lowke, D. Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). *Cement and Concrete Research* 2020, *134*, 106078, doi:10.1016/j.cemconres.2020.106078.
14. Freund, N.; Dressler, I.; Lowke, D. Studying the Bond Properties of Vertical Integrated Short Reinforcement in the Shotcrete 3D Printing Process. In *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*; Bos, F.P., Lucas, S.S., Wolfs, R.J., Salet, T.A., Eds.; Springer International Publishing: Cham, 2020; pp 612–621, ISBN 978-3-030-49915-0.
15. Freund, N.; Lowke, D. Interlayer Reinforcement in Shotcrete-3D-Printing. *Open Conf Proc* 2022, *1*, 83–95, doi:10.52825/ocp.v1i.72.
16. Dörrie, R.; David, M.; Freund, N.; Lowke, D.; Dröder, K.; Kloft, H. In-Process Integration of Reinforcement for Construction Elements During Shotcrete 3D Printing. *Open Conf Proc* 2023, *3*, doi:10.52825/ocp.v3i.224.
17. Hack, N.; Bahar, M.; Hühne, C.; Lopez, W.; Gantner, S.; Khader, N.; Rothe, T. Development of a Robot-Based Multi-Directional Dynamic Fiber Winding Process for Additive Manufacturing Using Shotcrete 3D Printing. *Fibers* 2021, *9*, 39, doi:10.3390/fib9060039.
18. Kloft, H.; Empelmann, M.; Oettel, V.; Ledderose, L. 3D Concrete Printing – Production of first 3D Printed Concrete Columns and Reinforced Concrete Columns. *BFT International*, no. 6 2020, 28–37.
19. Müller, J.; Grabowski, M.; Müller, C.; Hensel, J.; Unglaub, J.; Thiele, K.; Kloft, H.; Dilger, K. Design and Parameter Identification of Wire and Arc Additively Manufactured (WAAM) Steel Bars for Use in Construction. *Metals* 2019, *9*, 725, doi:10.3390/met9070725.
20. Dörrie, R.; Laghi, V.; Arrè, L.; Kienbaum, G.; Babovic, N.; Hack, N.; Kloft, H. Combined Additive Manufacturing Techniques for Adaptive Coastline Protection Structures. *Buildings* 2022, *12*, 1806, doi:10.3390/buildings12111806.
21. Kloft, H.; Hack, N.; Mainka, J.; Brohmann, L.; Herrmann, E.; Ledderose, L.; Lowke, D. Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP). *Bau-technik* 2019, *96*, 929–938, doi:10.1002/bate.201900094.
22. Classen, M.; Ungerermann, J.; Sharma, R. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete—Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement. *Applied Sciences* 2020, *10*, 3791, doi:10.3390/app10113791.

23. Straßer, A.; Riegger, F.; Hamilton, L.D.; Kränkel, T.; Gehlen, C.; Zaeh, M.F.; Kwade, A. Selective Paste Intrusion: Integration of reinforcement by WAAM — Concept and current research with special attention to cooling strategies. *Construction and Building Materials* 2023, 406, 133236, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.133236.
24. RILEM RC6. *Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test*, 1983.

Biomechanik der Knochen

UDO NACKENHORST

Leibniz Universität Hannover, Institut für Baumechanik und numerische Mechanik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover

1 Einleitung

Knochen sind lebende Organe, die u. a. im Metabolismus der Körper wichtige Funktionen übernehmen und in der Lage sind, z. B. Frakturen auszuheilen. Sie verfügen ferner über die Fähigkeit, ihre innere Struktur und äußere Gestalt an die mechanischen Beanspruchungsbedingungen anzupassen (Wolff, 1892 [10]). Diese Adaptionsfähigkeit der Knochen wird durch ein orchestrales Zusammenwirken von Knochenzellen gesteuert: Osteozyten, die lokal verteilt in die Knochenmatrix eingebettet sind, detektieren den Bedarf des Knochenumbaus, Osteoklasten bauen schadhaftes Knochengewebe ab und anschließend werden die Bereiche von Osteoblasten wiederaufgebaut. Dabei nutzen die Osteozyten eine bislang nicht abschließend geklärte Form der Sensorik, die insbesondere bezüglich der lokalen mechanischen Beanspruchung oder Schädigung sensitiv ist. Im Sinne der mechanischen Tragstrukturen formieren sich Knochen somit immer optimal.

Dass die Mechanik dabei eine wichtige Rolle einnimmt, ist in der körperlichen Aktivität zu beobachten. Sportlich aktive Menschen weisen in der Regel eine deutlich stärkere Struktur des Knochenskeletts auf als eher inaktive Personen. Bereits nach längerer Bettruhe kann ein Verlust an Knochenmasse festgestellt werden. Diese eigentlich sehr sinnvolle Aktivität der Knochen kann aber auch zu Komplikationen bei medizinischen Eingriffen führen. Wenn ein künstliches Knochenimplantat, z. B. eine Hüftgelenks-Endoprothese, erforderlich ist, dann wird der natürliche Kraftfluss im Knochen durch das vergleichsweise steife Implantat gestört. Bei unglücklichem Design der Implantate kann dieses sogar zu einem frühzeitigen Implantat Versagen führen.

Die Mechanik, oder präziser die Ingenieur-Mechanik, beschäftigt sich mit Wirkung von Kräften auf Körpern. Dabei bedient sie sich naturwissenschaftlichen Grundgesetzen (Bilanzgleichungen, Erhaltungssätzen), der geometrischen Beschreibung von Verformungen und zumeist empirischen Materialgleichungen, die das Verhalten des individuellen Stoffs beschreiben. Mathematisch wird dies durch gekoppelte nichtlineare partielle Differenzialgleichungen beschrieben, die nur für einfache akademische Beispiele geschlossen lösbar sind. Darum werden heute numerische Näherungsverfahren eingesetzt, in der Festkörpermechanik ist hier die Finite Element Methode (FEM) der Standard [11]. Um somit in diesem Rahmen das biomechanische Verhalten von Knochen simulieren zu können, ist

insbesondere die oben skizzierte Fähigkeit der Knochen durch entsprechend berechenbare Materialmodelle zu beschreiben, die im Rahmen einer thermodynamisch konsistenten Konstitutivtheorie und im Rahmen der FEM robust und effizient berechenbar ist [2].

Der Autor forscht auf dem Gebiet der numerischen Mechanik und der Materialmodellierung, wobei die Knochenmechanik seit fast 40 Jahren ein Anwendungsgebiet ist. Nachfolgend soll diese Geschichte kurz skizziert werden, wobei im Rahmen dieses Übersichtsaufsatzes gänzlich auf den mathematischen und numerischen Hintergrund verzichtet wird, diesbezüglich wird auf entsprechende Publikation verwiesen werden. Ziel dieses Aufsatzes kann es daher lediglich sein, Eindrücke über die Möglichkeiten und Grenzen der Mechanik am Beispiel der Knochen zur Beschreibung natürlicher Prozesse zu vermitteln.

2 Die Anfänge der Knochen-Biomechanik

Motiviert durch das swedish arthroplasty register begannen Anfang 1990 die ersten Ansätze, das mechanische Adaptionsvermögen von Knochen mittels numerischer Simulation nachzubilden [1, 8]. Der Autor hatte zu dieser Zeit gemeinsam mit einem Diplomanden dieses Thema aufgegriffen, und die damaligen heuristischen Ansätze versucht, in ein numerisch konsistentes Konzept zu überführen. Die frühen Ergebnisse, die hier in Abb. 1 wiedergegeben sind, motivierten dazu, dieses Thema weiter zu verfolgen.

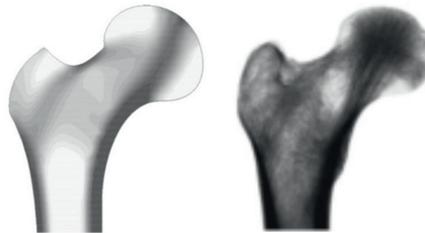


Abb. 1. Vergleich der Berechneten Knochenmassedichteverteilung im proximalen Femur (links) und einer hochauflösten Röntgenaufnahme (rechts).

In Abb. 1 ist rechts eine Aufnahme der Knochenstruktur des Oberschenkelkopfes gezeigt und links die Ergebnisse der numerischen Simulation. Diese sind verschmiert dargestellt, da im Rahmen der Kontinuums-Theorie die diskreten trabekularen Strukturen nicht abbildbar sind (und dieses wäre auch mit der heute verfügbaren Rechnerausstattung nicht sinnbringend möglich). Aber die Ausbildung der Knochenarchitektur entsprechend der mechanischen Beanspruchung ist deutlich erkennbar. Damit war einerseits deutlich belegt, dass bereits mit einfachen

Theorien der Knochenumbildungsprozess simulierbar ist, und dass andererseits die Mechanik hier einen dominierenden Trigger darstellt. Motiviert durch diese frühen Erfahrungen wurde dieses Themengebiet durch den Autor stetig weiterverfolgt.

Bereits mit diesen frühen Ansätzen, wenngleich aus theoretischer und numerischer Sicht noch nicht auf dem heutigen Stand der Technik, konnten bereits erste Prognosen zu den Versagensmechanismen der frühen Generation von Hüftgelenks-Endoprothesen, der aseptischen Lockerung, simuliert werden.



Abb. 2. Simulierte Veränderung der Knochenstruktur im Oberschenkelknochen zufolge einer Hüftgelenks-Endoprothese, links postoperativ, rechts Langzeitreaktion.

Dargestellt ist mit einer röntgenbildähnlichen Abbildung die Knochenmasseverteilung, links im Zustand unmittelbar postoperativ und rechts die Langzeitreaktion des Knochens. Die helle Farbe bedeutet hier eine große Knochenmasse und die dunkle entsprechend geringe bis verschwindende Knochenmasse. Es ist klar ersichtlich, dass es im proximalen (gelenknahen) Bereich zu einer deutlichen Abnahme der Knochenmasse kommt, bedingt durch die Lastumlagerung zufolge des vergleichsweise steifen Implantats. Das heißt, der umgebende Knochen wird nicht mehr hinreichend mechanisch beansprucht und bildet sich zurück. Die Verankerung des Implantats geht verloren und für eine Revision mit Standard-Implantaten ist die verbliebene Knochenstruktur nicht mehr geeignete. Auch wenn dieses Ergebnis schwerlich validierbar noch quantifizierbar ist, wird deutlich, dass ein solches Implantat-Design biomechanisch nicht kompatibel ist. Die Plausibilität dieser qualitativen Ergebnisse ist durch klinische Studien belegt.

3 Die stetige Weiterentwicklung und Verfeinerung der Modelle

Im Fortgang dieser Arbeiten wurden die Modelle stetig verfeinert, so dass heute patientenindividuelle Analysen möglich sind. Ausgehend von CT-Daten werden dafür sehr detaillierte drei-dimensionale Finite Element Modelle erstellt [6], in die dann das Implantat hineinmodelliert wird.

Es wurden verschiedene Implantat-Systeme untersucht. Ein eher schlechtes Beispiel ist in Abb. 3 dargestellt, die sogenannte Druckscheiben-Prothese. Motivation für dieses Implantat-Design war, die Prothese möglichst im Oberschenkelhals zu belassen, um den distalen Knochen nicht zu schädigen, damit eine Zweitversorgung problemlos möglich ist. Die Mediziner beklagten jedoch eine hohe Frühversagensrate, die sich z. B. durch Dislokationen äußerten. Mit unseren Studien konnte eine Erklärung geliefert werden. Der Knochenbereich oberhalb des Prothesen-Ankers wird vollständig entlastet. Hier bildet sich der Knochen zurück und die Verankerung des Implantats wird instabil. Diese Implantate wurden bereits nach kurzer Nutzungsdauer durch die Patienten revidiert. Heute haben sich moderne Kurz-Schaft-Prothesen weitestgehend durchgesetzt.

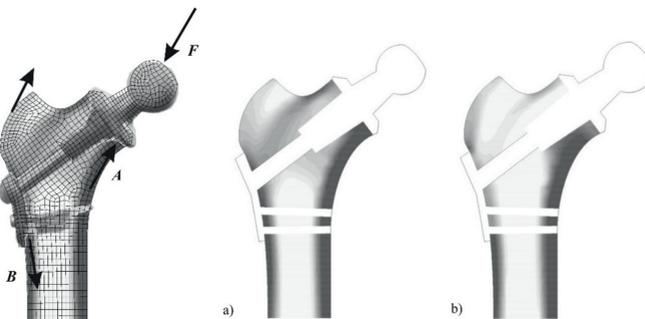


Abb. 3. Druckscheibenprothese: links das Finite Element Modell, A und B beschreiben die wesentlichen Lasteintragungsorte in den Knochen, a) Knochenmasseverteilung unmittelbar postoperativ und b) Langzeitverhalten.

Modellverfeinerungen wurden im Laufe der Jahre stetig hinzugefügt. Das Modell wurde erweitert, um das knöchernen Einwachsen von Implantaten in den ersten Wochen nach der Operation simulieren zu können. Erste Simulationen zeigten, dass das Implantat nicht auf seiner gesamten Oberfläche mit dem Knochen verwächst, eine Beobachtung die klinisch an Explantaten bestätigt ist [7].

Daneben wurden Modelle entwickelt, um ein besseres Verständnis über die Sensorik der Knochenzellen zu entwickeln. Lenz [5] entwickelt in seiner Doktorarbeit ein Mehrskalens-Modell, um den hierarchischen Aufbau des Knochens bis hinunter auf die Ebene der Osteozyten zu simulieren. Kardas [4] modelliert die Knochen-

zelle selbst sehr detailliert, um weiteren Aufschluss über den mechanischen Stimulus zu entwickeln. Am Ende dieser Diskussion scheint es sehr unwahrscheinlich, dass in einem intakten Knochengewebe ein Stimulus erfolgt, vielmehr liegt die Theorie nahe, dass lokale Mikro-Frakturen in dem Kommunikationsnetzwerk der Osteozyten der auslösende Mechanismus ist (*fracture and repair*).

Etwas losgelöst von dem Fokus auf Implantate wurde in der Doktorarbeit von Sapotnick ein Simulationsmodell für die Frakturheilung entwickelt [9]. Hier wird das Zusammenspiel einer Vielzahl von Körperzellen beschrieben. Sensitivitätsstudien geben Aufschluss über die wichtigsten Modellparameter. Die erzielten Ergebnisse stimmen sehr gut mit Daten aus Tierversuchen überein. In diesem Projekt bestand ein besonderer wissenschaftlicher Reiz darin, eine hohe Anzahl von nichtlinear gekoppelten partiellen Differentialgleichungen numerisch robust zu lösen.

Der Frage, wie es eigentlich zu einer Arthrose des Hüftgelenks kommt, geht Fietz nach [3]. In dieser Arbeit wurde der physiologische Gelenkkontakt modelliert, bestehend aus geometrisch exakten Modellen des Hüftgelenks, des Gelenkknorpels, der Gelenkflüssigkeit und der Gelenkkapsel. Dabei kommt dem Labrum, einer Dichtlippe aus Knorpelgewebe (analog zum Meniskus) eine wichtige Bedeutung zu. Eine Verletzung des Labrums führt unweigerlich zu einer unzureichenden Versorgung des Knorpels mit Gelenkflüssigkeit und kann somit als Prä-Arthrose interpretiert werden.

4 Aktuelle Forschungsarbeit

Aktuell werden diese Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereich/Transregio 298 gemeinsam mit der Medizinischen Hochschule fortgeführt. Ziel ist es, die seit langen Jahren entwickelten Methoden am Beispiel der Hüftgelenks-Endoprothese in die klinische Praxis zu bringen. Bislang sind die einzelnen Berechnungsschritte für die patientenindividuelle Prognose rechentechnisch sehr aufwändig und bedürfen Expertenkompetenzen. Mittels Modellreduktionsverfahren werden Surrogat-Modelle erstellt, mit denen der Parameter-Raum typischer Patientenkollektive und Implantat-Positionen abgebildet wird. Solche Surrogat-Modelle benötigen nur sehr geringe Berechnungszeit, um parametrische Untersuchungen durchzuführen. Vision ist hier, dem behandelnden Arzt ein Werkzeug an die Hand zu geben, dass er gemeinsam mit dem Patienten bezüglich optimaler Operationsstrategien durchspielen kann.

5 Möglichkeiten und Grenzen

Die numerische Mechanik darf nicht als allein stehende Naturwissenschaft verstanden werden, es ist immer ein Abgleich der Modelle mit Experimenten nötig, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen. Diese Wissenschaft ermöglicht allerdings Einblicke in physikalische Prozesse, die experimentell nur sehr schwer oder gar nicht zugänglich sind. Während es im klassischen Ingenieurwesen nahezu immer möglich ist, die Modelle mittels experimenteller Untersuchungen zu validieren, ist dieses in der Bio-Mechanik schwerlich möglich, weil wir es hier mit lebenden Materialien zu tun haben, bei denen wir die wesentlichen Größen der Modelle (Mechanische Spannungen etc.) mit der heutigen Technik lokal nicht erfassen können. Es ist lediglich eine Plausibilitätsprüfung möglich, sind die Modellaussagen mit klinischen Beobachtungen im Einklang.

Letzteres kann aufgrund der langjährigen Zusammenarbeit des Autors mit klinischen Praktikern eindeutig bejaht werden. Wir sind jedoch weit davon entfernt, auf diesem Wege patientenindividuelle Prognosen zu erstellen. Möglich ist es heute, ein schlechtes Prothesendesign von einem guten zu unterscheiden. Auch bezüglich der Operationstechnik, wie ein Implantat am besten zu positionieren ist, können gute Aussagen gemacht werden. Definitiv nicht möglich ist es heute, für einen spezifischen Patienten zu prognostizieren, dass dieses oder jenes Implantat eine Nutzungsdauer von x Jahren hat.

Einen Schritt in diese Richtung versprechen die aktuellen Forschungen zu den Modellreduktionsverfahren. In einem nächsten Schritt können diese Methoden dann mit den klinischen Daten KI-basiert zusammengeführt werden, um somit in naher Zukunft statistisch aussagekräftige Prognosen für die Behandlung mit Hüftgelenks-Endprothesen etc. treffen zu können.

Literatur

- [1] Beaupre, G.S., Orr, T.E. and Carter, D.R.: An Approach for Time-Dependent Bone Modeling and Remodeling, *J. of Orthopaedic Research* 8, 1990
- [2] De Souza Neto, E.A., Peric, D., Owen, D. J. R.: *Computational Plasticity*, Wiley, 2008
- [3] Fietz, K. and Nackenhorst, U.: A finite element approach for modelling hip joint contact PAMM, 2011
- [4] Kardas, D., Nackenhorst, U. and Balzani, D.: Computational model for the cell-mechanical response of the osteocyte cytoskeleton based on self-stabilizing tensegrity structures. *Biomech Model Mechanobiol* 12, 2013
- [5] Lenz, C. and Nackenhorst, U.: A Numerical Approach to Mechanosensation of Bone Tissue based on a Micromechanical Analysis of a Single Osteon, PAMM, 2004.

- [6] Lutz, A., Nackenhorst, U.: Numerical investigations on the biomechanical compatibility of hip-joint endoprostheses, *Archive of Applied Mechanics*, 2010
- [7] Lutz, A. and Nackenhorst U.: A Computatinal Approach on the Osseointegration of Bone Implants Based on a Bio-Active Interface Theory, *Gamm-Mitteilung* 32 (2), 2009
- [8] Huiskes, R., Weinans, H. and Rietbergen, B.: The Relationship between stress shielding and bone resorption around total hip stems and the effects of flexible materials, *Clinical Orthopaedics and Related Research* 274, 1992
- [9] Sapotnick, A., Nackenhorst, U.: A Mechanically Stimulated Fracture Healing Model Using a Finite Element Framework. In: Lenarz, T., Wriggers, P. (eds), *Biomedical Technology. Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 2015
- [10] Wolff, J.: *Das Gesetz der Transformation der Knochen*, Hirschwald, 1892
- [11] Zienkiewicz, O. C. and Taylor, R. L.: *The Finite Element Method*, Butterworth-Heinemann, 2013

FESTVERANSTALTUNG
mit Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille am 21. April 2023

Begrüßung

REINHOLD HAUX

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Hohe Festversammlung,
verehrte Gäste,
meine sehr geehrten Damen und Herren,

zur diesjährigen Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) möchte ich Sie alle sehr herzlich begrüßen. Ihre Anwesenheit belegt Ihr Interesse an unserer akademischen Institution und ihrer Arbeit. Und sie mag auch Ihre Verbundenheit mit unserer Gelehrtengesellschaft aufzeigen.

Der wissenschaftliche Kern unserer Jahresversammlung ist seit 74 Jahren, seit dem Jahr 1949, die Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille für herausragende wissenschaftliche Leistungen. Für das Jahr 2023 hat das Konzil der BWG auf Vorschlag der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften als 77. Preisträgerin eine Mathematikerin ausgewählt, eine Lehrstuhlinhaberin für Zahlentheorie: Frau Professorin Maryna Viazovska von der École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Sehr geehrte Frau Kollegin Viazovska, Herzlich willkommen! Welcome! Ласкаво просимо! Bienvenue! Wir freuen uns, dass Sie nach Braunschweig gekommen sind, um die Carl Friedrich Gauß-Medaille 2023 entgegen zu nehmen und um einen Festvortrag auf dieser Jahresversammlung zu halten.

Damit Sie – und auch alle Gäste – erfahren, in welchem Kreis sie sich befinden, darf ich nun einige der Gäste namentlich begrüßen.

Anlässlich der Preisverleihung gab es heute Vormittag ein Kolloquium über Modulformen und Kugelpackungen. Vortragende waren Professor Henry Cohn (MIT und Microsoft Research, Cambridge, New England, USA), Professorin Gabriele Nebe (RWTH Aachen) und Professor Don Zagier (MPI für Mathematik Bonn und ICTP Trieste). Die Laudatio wird anschließend Professor Jürg Kramer

(Humboldt-Universität zu Berlin) halten. Herzlichen Dank an alle für Ihr Engagement. Zudem wird Professor Joachim Escher (Leibniz Universität Hannover) als Präsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, also *der* renommierten deutschen Mathematik-Fachgesellschaft, ein Grußwort sprechen. Die BWG ist stolz darauf, dass Sie, Herr Kollege Escher, ein Mitglied unserer Gelehrten-gesellschaft, kürzlich in dieses Amt gewählt wurde. Zudem möchte ich der DMV für die gemeinsam durchgeführte Öffentlichkeitsarbeit danken.

Die Vorbereitungen zur Preisvergabe, zur Organisation der Preisverleihung und zur Ausgestaltung des Kolloquiums sind eng verbunden mit Professor Klaus Hulek (Leibniz Universität Hannover). Lieber Herr Kollege Hulek, für Ihr unermüdliches Engagement möchte ich mich besonders bedanken. Nach meiner Begrüßung und nach meinem Bericht werden Sie die Moderation übernehmen.

Die Jahresversammlung findet auch in diesem Jahr wieder in der Dornse statt, einem gleichermaßen schönen, wie auch geschichtsträchtigen Raum. Hier geht mein Dank an die Stadt Braunschweig, die uns dies ermöglicht und die auch sonst die BWG in vielfältiger Weise unterstützt. Sehr geehrte Frau Professorin Anja Hesse, Sie werden als Dezernentin für Kultur und Wissenschaft der Stadt Braunschweig ein Grußwort sprechen. Vielen Dank! Begrüßen möchte auch Frau Bürgermeisterin Annegret Ihbe.

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts des Landes Niedersachsen, in dessen Ministerium für Wissenschaft und Kultur als für uns zuständigen Geschäftsbereich wir uns gut aufgehoben und unterstützt fühlen. Als Vertreter der Landesregierung begrüße ich den Niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kultur, Herrn Falko Mohrs. Herr Minister Mohrs, Sie haben zudem auch zugesagt, ein Grußwort zu sprechen. Die Zusage Ihres Grußwortes verstehe ich als Beleg der Wertschätzung der Landesregierung für die Rolle der Gelehrten-gesellschaften – aus historischen Gründen haben wir zwei im Land Niedersachsen.

Erlauben Sie mir nun, Vertreter aus anderen Gelehrten-gesellschaften zu begrüßen. Herzlich willkommen heiße ich den Präsidenten der Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, Herrn Professor Daniel Göske, Herrn Professor Gisbert zu Putlitz aus der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, der als Alt-Präsident den aktuellen Präsidenten Schneidmüller vertritt, und Frau Dr. Mariya Savchenko von der Nationalen Akademie der Wissenschaften der Ukraine. Lieber Herr Göske, seit vielen Jahren arbeiten die Göttinger Akademie und die BWG als niedersächsische Gelehrten-gesellschaften zusammen, eine Zusammenarbeit die, wie ich glaube sagen zu können, nicht nur wissenschaftlich produktiv ist, sondern die uns durchaus auch Freude bereitet.

Besonders die ordentlichen Mitglieder der BWG haben ihre wissenschaftliche Heimat vorrangig in den Universitäten und Forschungseinrichtungen des Dreiecks Braunschweig – Clausthal – Hannover. Das hat zum einen historische Gründe. Es begründet sich aber auch dadurch, dass in dieser Region – es ist, auch im internationalen Vergleich, eine der forschungsintensivsten Regionen – die technisch ausgerichteten Universitäten Niedersachsens liegen. Universitäten und Gelehrtengesellschaften haben unterschiedliche, sich ergänzende Aufgaben. Es freut mich, dass der Präsident der Leibniz Universität Hannover, Professor Volker Epping, und die Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig, Professorin Angela Ittel, heute zu dieser Festveranstaltung gekommen sind. Magnifizenzen, liebe Frau Ittel, lieber Herr Epping, durch Ihr Kommen verdeutlichen Sie die Verbundenheit von Universitäten und Gelehrtengesellschaften.

Begrüßen möchte ich die anwesenden Vertreterinnen und Vertreter aus den Parlamenten: den Bundestagsabgeordneten Herrn Carsten Müller und die Landtagsabgeordnete Frau Julia Retzlaff. In Zeiten von vermehrter Desinformation und von ‚Fake News‘ ist es wichtig, dass Sie über wissenschaftliche Einrichtungen seriöse, unverzerrte Informationen erhalten und dass wir mit Ihnen im Austausch bleiben.

Die Evangelisch-Lutherische Landeskirche in Braunschweig, die Stiftung Braunschweigischer Kulturbesitz, die TU Braunschweig und die BWG vergeben gemeinsam alle zwei Jahre den Abt Jerusalem-Preis für herausragende Beiträge zum Dialog der Geistes-, Natur- und Technikwissenschaften. Es freut mich sehr, dass der Bischof der Evangelisch-Lutherischen Landeskirche in Braunschweig, Herr Dr. Christoph Meyns, und die Direktorin der Stiftung Braunschweigischer Kulturbesitz, Frau Maria-Rosa Berghahn, zu der heutigen Jahresversammlung gekommen sind. Begrüßen möchte ich auch Frau Brigitte Blum, die Vorsitzende der Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis.

Nun sollte ich noch zahlreiche andere Ehrengäste aus Stiftungen, Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft begrüßen. Ich bitte im Nachsicht und Verständnis, dass mir dies aus Zeitgründen nicht möglich ist. Seien Sie alle herzlich willkommen! Danke dass Sie hier sind.

Es folgen nun die drei Grußworte von Professorin Hesse, Professor Escher und Minister Mohrs.

Grußwort der Stadt Braunschweig, vertreten durch die Dezernentin für Kultur und Wissenschaft Frau Anja Hesse, anlässlich der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft mit Verleihung der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille am 21. April 2023 an die Mathematikerin Prof. Dr. Maryna Viazovska – es gilt das gesprochene Wort –

Sehr geehrter Herr Minister Mohrs,
sehr geehrte Abgeordnete des Bundes- und des Landtags,
sehr geehrte Mitglieder des Rates der Stadt Braunschweig,
sehr geehrter Herr Präsident Haux,
sehr geehrte Frau Professor Viazovska, Schanowni Professore Viazovska,
meine sehr geehrten Damen und Herren,

es ist mir eine ausgesprochene Freude und eine große Ehre als Dezernentin für Kultur und Wissenschaft, hier heute Nachmittag im Namen der Stadt Braunschweig einige Worte sagen zu dürfen. Und dies auch noch in einem der schönsten gotischen Gebäude, das diese Stadt zu bieten hat und welches mir als Kunsthistorikerin natürlich besonders am Herzen liegt. Braunschweig kann allerdings nicht nur auf eine lange Traditionslinie und geschichtliches Kulturgut zurückblicken, Braunschweig blickt auch nach vorne, in eine Zukunft voller Innovation. Wir sind eine der führenden Regionen für Forschung und Entwicklung in der EU und darauf sind wir stolz. Ein so wichtiges interdisziplinäres Forschungsnetzwerk wie die „Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft“ stellt einen der Pfeiler dar, auf dem diese Zukunft basiert.

Nicht nur, dass das Netzwerk den lebendigen und, ich würde behaupten, sogar lebensnotwendigen Austausch der Wissenschaft befördert, die „Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft“ vergibt schon seit 1949 die Gauß-Medaille an herausragende Persönlichkeiten internationaler Forschung aus den verschiedensten Wissenschaftsdisziplinen und ist damit Verleiherin einer der wichtigsten Forschungs-Auszeichnungen für unsere Region. Die heutige Verleihung ist aber auch für die Stadt Braunschweig eine sehr Besondere: Mit Maryna Viazovska wird hier heute eine international bekannte Ausnahmemaematikerin geehrt.

Herzlich willkommen! Laskavo Prossimo Dschimka Professore Viazovska!

Frau Viazovska, Sie sind 38 Jahre alt und haben schon alles erreicht, was man sich an Auszeichnungen auf Ihrem Gebiet nur vorstellen kann. Im letzten Jahr wurde Ihnen die höchste internationale Auszeichnung in der Mathematik, die Fields-Medaille, überreicht. Ich habe mir sagen lassen, dass die Entscheidung, Sie auch mit der Gauß-Medaille zu ehren, schon davor gefallen war und wir sind sehr froh und stolz, dass Sie nun im Rahmen dieser Ehrung nach Braunschweig gekommen sind.

Denn wer wäre prädestinierter für diese Auszeichnung?

Maryna Viazovska verbindet mit Carl Friedrich Gauß nicht nur das gemeinsame Interesse an der mathematischen Lösung zur „Keplerschen Vermutung“, sondern auch die schon frühe, noch in der Jugendzeit entdeckte Leidenschaft für die Mathematik.

So existiert über den neunjährigen Gauß die Anekdote, dass dieser bereits in der Volksschule die Zahlen von 1 bis 100 in nur wenigen Minuten zusammenrechnen konnte, da er das dahinterliegende Prinzip erkannte, welches später als die Gaußsche Summenformel in den Schulbüchern gelehrt wurde. Sowohl Gauß als auch Maryna Viazovska haben ihre frühe Leidenschaft genutzt und daraus eine beispiellose akademische Karriere gemacht.

Neben dem gebürtigen Braunschweiger und Universalgelehrten Gauß, der natürlich einer der berühmtesten Söhne dieser Stadt ist und dessen 250. Geburtstag wir in vier Jahren begehen, hat auch Johannes Kepler eine zumindest mittelbare Verbindung zu Braunschweig. Seine wichtigsten Beobachtungen machte er im 17. Jahrhundert, der Zeit des Barock – einer Epoche, die eine prägende Rolle für die Stilistik von Braunschweig spielt.

Wenn Maryna Viazovska nun viele Jahrhunderte später ein so wichtiger mathematischer Beweis für Keplers Vermutung gelungen ist, zeigt sich daran aber auch, wie sehr die Zeiten sich geändert haben. Im Jahr 2023 steht hier eine junge Frau und Mutter, die mit ihrer Beharrlichkeit und ihrer Liebe zur Zahlentheorie ein Vorbild für so viele Menschen geworden ist.

Ein Umstand, der lange Zeit, in denen Frauen die Türen zu führenden Forschungseinrichtungen verschlossen waren, nicht denkbar gewesen wäre. Wir können nur erahnen, wieviel geistiges Potenzial durch die Beschneidung von Rechten und Freiheit unserer Welt damit verloren gegangen ist. Freiheit und gesellschaftliche Vielfalt sind der Nährboden für Wissenschaft und Forschung.

Frau Viazovska, Sie haben Unglaubliches geleistet. In Interviews merkt man Ihnen die große Begeisterung für Ihr Feld deutlich an. Doch Sie haben auch davon gesprochen, dass die Mathematik Sie gerettet und geerdet hat, wenn Ihre Gedanken immer wieder zu den schrecklichen Kriegsereignissen in ihrem Heimatland, der Ukraine, gewandert sind. Ich wünsche Ihnen und Ihren Angehörigen viel Kraft in dieser schweren Zeit.

Maryna Viazovska steht mit ihren Errungenschaften als Mathematikerin nicht nur für exzellente Forschung, sie steht auch für Fortschritt. Nicht zuletzt, weil viele der von ihr eruierten mathematischen Prinzipien in der Coding-Theorie Anwendung finden, repräsentiert sie den zu Beginn meiner Rede schon erwähnten Blick nach vorn, den Blick in die Zukunft.

Wir alle wünschen uns, dass diese Zukunft von Freiheit gekennzeichnet sein wird, in der Politik ebenso wie in der Wissenschaft. Damit wir uns auch weiterhin von Ausnahmewissenschaftlerinnen wie Maryna Viazovska inspirieren lassen können, die diese Welt weiter voranbringen.

Frau Viazovska, es ist mir eine besondere Ehre, Sie hier heute im Namen der Stadt Braunschweig begrüßen zu dürfen. Ich übergebe nun das Wort an den Präsidenten der Deutschen Mathematiker-Vereinigung, Herrn Prof. Dr. Joachim Escher, und bedanke mich herzlich für Ihre Aufmerksamkeit.

**Grußwort des Präsidenten der DMV anlässlich der Verleihung
der Gauß-Medaille 2023 der
Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft
an Maryna Viazovska**

JOACHIM ESCHER

Sehr geehrter Herr Minister Mohrs,
sehr geehrte Frau Präsidentin Ittel,
sehr geehrter Herr Präsident Epping,
sehr geehrter Herr Präsident Haux,
sehr geehrte Frau Bürgermeisterin Ihbe,
sehr geehrte Kollegin Viazovska,
sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen,
verehrte Gäste!

Es ist mir als Präsident der Deutschen Mathematiker-Vereinigung eine außerordentlich große Freude und Ehre, sie heute anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille an Frau Kollegin Maryna Viasovska begrüßen zu dürfen. Die DMV ist die größte Fachgesellschaft für Mathematik in Deutschland und zählt aktuell ungefähr 5000 Mitglieder. Zu den vielen Aufgaben der DMV als Fachgesellschaft für Mathematik gehört insbesondere auch, das Bild der Mathematik in der Gesellschaft weiterzuentwickeln. Dazu möchte ich mit Ihnen ein paar Gedanken teilen.

Um es ohne Umschweife auf den Punkt zu bringen: Es ist kein leichtes Unterfangen, das Bild der Mathematik in der Öffentlichkeit, in der Gesellschaft weiterzuentwickeln. Ich erinnere dazu an Hans Magnus Enzensbergers wunderbaren Artikel *Zugbrücke außer Betrieb. Die Mathematik im Jenseits der Kultur* – Eine Außenansicht aus dem Jahre 1998, erschienen in der FAZ, in dem Enzensberger – in seinem unvergleichlichen Duktus – die Problematik aus verschiedenen Aspekten tief sinnig beleuchtet.

Bevor wir die angesprochene Außenansicht etwas genauer betrachten wollen, noch etwas Innenansicht: Was ist Mathematik aus Sicht der Mathematikerinnen und Mathematiker? Dazu darf ich Carl Friedrich Gauß zu Wort kommen lassen: „Die Mathematik ist die Königin der Wissenschaften!“ Dieses Zitat von Carl Friedrich Gauß darf am heutigen Anlass nicht fehlen und jede Mathematikerin und jeder Mathematiker nickt hier zustimmend, zumindest innerlich. Meine Er-

fahrung lehrt mich allerdings auch, dass Nicht-Mathematikern das Nicken an der Stelle oft etwas schwerer fällt. Aber ich will nicht abschweifen.

Deshalb zurück zu Enzenbergers Zitat. Um es mit Alt-Bundespräsident Johannes Rau zu sagen: „Trau keinem Zitat, dass Du nicht selbst aus dem Zusammenhang gerissen hast!“ Gauß' vollständiges Zitat lautet nämlich: „Die Mathematik ist die Königin der Wissenschaften und die Arithmetik ist die Königin der Mathematik!“ Der zweite Teil, in dem die Zahlentheorie gemeint ist, macht den Umgang mit Gauß' Zitat selbst innermathematisch nicht einfacher. Deshalb hier ein weiterer Versuch: Konrad Knopp erklärte ganz im Gaußschen Sinne in seiner Tübinger Antrittsrede von 1927 triumphierend, die Mathematik sei die Grundlage aller Erkenntnis und die Trägerin aller höheren Kultur. Enzensbergers Kommentar hierzu: „Hoch gegriffen und pathetisch formuliert, aber nicht falsch!“ Wie recht er hat in beiden Punkten! Aber wie will man damit bei Nicht-Mathematikern für die Sache werben? Hoch gegriffen und pathetisch! Charmant sind zweifellos auch Nicht-Definitionen, wie etwa von E.T. Bell 1951 formuliert: „Each of the quoted attempts to define mathematics illustrates the hopelessness of trying to paint a brilliant sunrise in one colour. The attempt to compress the free spirit of modern mathematics into an inch in a dictionary is as futile as trying to squeeze an ever-expanding thundercloud in a pint bottle.“

Damit will ich es mit der Innenansicht gut sein lassen und mich wieder Enzensbergers Text zuwenden. Auch wenn Enzensberger mit feiner impliziter Kritik an den Mathematikern nicht spart, wenn er etwa festhält, dass „Mehr als früher sind sich die Mathematiker bewusst, daß ihre Kathedrale nie fertiggestellt werden wird und dass es für dieses Werk nicht einmal einen lückenlosen Bauplan geben kann. Viele sind sogar bereit, mit Nichtmathematikern zu reden!“ versucht Enzensbergers Text doch an vielen Stellen den Dialog zu befördern. Etwa wenn er schreibt: „Auch für mich bleibt die Zugbrücke zu ihrer Insel hochgezogen. Das hindert mich jedoch nicht daran, den einen oder anderen Blick auf das andere Ufer zu werfen.“ Lassen Sie mich diesen Gedanken aufnehmen und mein heutiges Hauptanliegen klar formulieren: Wir müssen über Mathematik, über mathematische Ideen und über wissenschaftliche Erfolge in der Mathematik sprechen! Das ist meine feste Überzeugung! Der heutige Anlass ist deshalb sehr wichtig für die Mathematik und ihr Bild in der Gesellschaft: Ein Kolloquium mit drei inspirierenden Vorträgen von heute Vormittag, gleich eine festliche Laudatio auf eine Kollegin, die mit ihrem wissenschaftlichen Werk glänzt und Glanz erzeugt und dadurch Interesse für die Mathematik weckt. Dafür bin ich in doppelten Sinne sehr dankbar, als Präsident der DMV und als Kollege.

Ich bedanke mich ausdrücklich bei allen, die dazu beigetragen haben, dass wir heute dieses Fest für die Mathematik feiern können. Nun wünsche ich uns allen viele Einsichten in die schönste Wissenschaft! Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

**Grußwort des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und
Kultur Falko Mohrs zur Verleihung der Carl Friedrich Gauß-
Medaille der BWG am Freitag, dem 21. April 2023
– es gilt das gesprochene Wort –**

FALKO MOHRS

Sehr geehrter Herr Prof. Haux,
sehr geehrte Frau Professorin Viazovska,
meine sehr geehrten Damen und Herren,

es ist mir eine große Freude heute zu Ihnen sprechen zu dürfen. Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft ist mit ihrer fast 80-jährigen Geschichte durch die Zusammenarbeit mit anderen wissenschaftlichen Institutionen im In- und Ausland und der interdisziplinären Vernetzung eine wichtige Säule in der Forschung in Niedersachsen.

Sie haben es, Prof. Haux, in Ihrer Antrittsrede als neuer Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft pointiert unter der leitenden Thematik „Erhalten und Erneuern“ aufgegriffen und ich möchte hiermit verdeutlichen: Die BWG ist eine traditionsreiche Wissenschaftsgesellschaft, die schon zu ihrer Gründung als ihr Fundament den interdisziplinären Austausch und die Zusammenarbeit wählte und damit eine visionäre Weitsicht bewies.

Eine Weitsicht, die besonders angesichts der gesamtgesellschaftlichen Herausforderungen der heutigen und vor uns liegenden Zeit in Klimawandel, Mobilität, Ernährung, Energiekrise und nicht zuletzt politischen und kriegerischen Auseinandersetzungen notwendig ist.

Hierfür braucht es konkret alle Fachdisziplinen und Gesellschaftsteile, um gemeinsam tragbare Lösungen zu entwickeln. Einstein beschrieb es treffend, als er feststellte: Probleme lassen sich niemals mit derselben Denkweise lösen, durch die sie entstanden sind.

Übertragen auf verschiedene Branchen illustriert dieser interdisziplinäre Ansatz zwischen Naturwissenschaft, Ingenieurwissenschaft und Geisteswissenschaften, dass Wissenschaft, Kultur, Bildung, Soziales und Medizin sich gegenseitig brauchen, um dauerhaft und effizient zu funktionieren.

Ein Transfer von einer Disziplin in eine Andere erlaubt einen Perspektivwechsel. Dieser Effekt wird durch einen längerfristigen Austausch oder eine Zusam-

menarbeit verstärkt. Außenstehende stellen gänzlich andere Fragen und reagieren mit frischem Blick auf tradierte Prozesse und Produkte. Gerade durch die Unterschiedlichkeit zwischen den Arbeitsbereichen ergeben sich anregende Impulse. Das vermeintliche „Normal“ gerät so auf den Prüfstand und hat bei einer Sensibilisierung Auswirkungen auf mehrere Disziplinen.

Die Österreichische Wissenschaftlerin und Künstlerin Claudia Schnugg spricht in diesem Zusammenhang von „Reibungsgewinnen“ und beschreibt damit die positiven Effekte der unvermeidlichen Reibung aufgrund der Heterogenität unterschiedlicher Arbeitsbereiche.

Ein wichtiges Element in der inter- oder transdisziplinären Zusammenarbeit ist die Schaffung von Vernetzungs- und Austauschgelegenheiten. Allzu häufig bleiben die Arbeitsbereiche unter sich, wo dieselbe Fachsprache gesprochen wird und Schwierigkeiten für Anknüpfungspunkte mit anderen Disziplinen entstehen. Umso wichtiger sind Netzwerke und Plattformen, wie Sie sie hier in der BWG und mit der Jungen BWG generationsübergreifend schaffen.

Eine solche Gelegenheit ist sicherlich das in diesem Februar zum zweiten Mal veranstaltete SYnENZ Symposium zum Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz.

Sie nehmen damit eine ganz grundlegende Fragestellung in den Blick. Vor allem die Medien fördern eine existenzielle Sicht auf Künstliche Intelligenz, in dem sie einen möglichen Ersatz von Menschen durch Maschinen und damit den Wegfall von Arbeitsplätzen betonen.

Bei näherer Beschäftigung mit Maschinenintelligenz wird jedoch deutlich, dass unsere Zukunft stärker von einem Zusammenspiel, also einer Kollaboration von Mensch und Maschine, geprägt sein wird. Es geht um die Frage, wie wir Künstliche Intelligenz menschenzentriert nutzen können.

Eine wichtige Rolle der Wissenschaft, aber auch der Kultur ist es, hier für ein ausgewogenes und realistisches Bild zu sorgen und Maschinen als durchaus wichtige Spezialwerkzeuge einzuordnen. In diesem Zusammenhang ist die vielfach betonte Schaffung von vertrauenswürdiger und verlässlicher KI, aber auch die Eruierung von Möglichkeiten der Beurteilung, Messbarkeit und Bewertung von großer Bedeutung.

Viele Forschungsbereiche haben mit ihren Produkten direkt oder indirekt große Auswirkungen auf unsere Gesellschaft. Denken Sie an Mobilität und autonome Fahrzeuge. Wie verändern sich unsere verkehrstechnischen Infrastrukturen, welche (auch psychologischen) Veränderungen kommen auf Fahrende und Passanten

in einem autonom fließenden Verkehr zu und wie verändern sich Mobilitäts-Gewohnheiten?

Das internationale Forschungszentrum Futurelab am Ars Electronica Center in Linz, Österreich, hat hierzu 2015 mit Mercedes Benz ein Projekt unter Beteiligung der Öffentlichkeit durchgeführt. Künstliche Intelligenz in anderen Anwendungsbereichen ist ein weiteres Beispiel und wir sollten aufpassen, dass wir nicht einerseits die technischen Entwicklungen vorantreiben und andererseits den Fokus auf den Menschen außer Acht lassen.

Heute aber sind wir hier, um einen ganz besonderen Menschen zu ehren. Prof. Dr. Maryna Viazovska ist Mathematikerin und erst die zweite Frau, der die renommierte Fields-Medaille verliehen wurde. Sie wurde in Kiew geboren und studierte hier und an der TU Kaiserslautern Mathematik.

2013 wurden Sie an der Universität Bonn bei Prof. Don Zagier promoviert und forschten dann am Institut des Hautes Etudes Scientifiques in der Nähe von Paris und an der Humboldt Universität zu Berlin. Zu Ihrer beeindruckenden fachlichen Expertise werden wir gleich in der Laudatio mehr hören.

Lassen Sie mich nur so viel sagen: Ich freue mich sehr, Sie hier in Braunschweig zu begrüßen, gratuliere Ihnen schon von meiner Seite zum Erhalt der Carl Friedrich Gauß-Medaille und danke Ihnen für Ihre wertvolle Arbeit, die zweifelsohne auch nachfolgenden Generationen zugute kommt.

Sie bearbeiten die jeweiligen mathematischen Probleme nicht nur mit großer Leidenschaft, sondern Sie haben auch eine Begabung, Ihre Erkenntnisse Anderen weiterzugeben.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Bericht

REINHOLD HAUX

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Meine Damen und Herren,

zu Beginn meines Berichtes ist es meine traurige Pflicht, der im Berichtsjahr verstorbenen Mitglieder unserer Gesellschaft zu gedenken.

Nachrufe

Am 6. Juli 2022 verstarb Prof. Dr.phil. Franz Rudolf Keßler, Professor für Physik an der TU Braunschweig. Er war seit 1969 ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften, seit 1992 korrespondierendes Mitglied.

Am 11. Oktober 2022 verstarb Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohnet, Professor für Verfahrenstechnik an der TU Braunschweig. Er war seit 1984 ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften und von 1997 bis 2000 Vorsitzender der Klasse.

Am 7. Dezember 2022 verstarb Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h.mult. Dr.rer.nat.h.c. Hans-Georg Unger, Professor für Hochfrequenztechnik an der TU Braunschweig. Er war seit 1995 ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften.

Am 13. Januar 2023 verstarb Prof. Dr.rer.nat. Peter Behrens, Professor für Anorganische Chemie an der Leibniz Universität Hannover. Er war seit 2003 ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften.

Am 8. Februar 2023 verstarb Prof. Dr.rer.nat. Klaus Görlitzer, Professor für Pharmazeutische Chemie an der TU Braunschweig. Seit 1995 war er ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften, seit 2005 korrespondierendes Mitglied.

Ich bitte Sie, sich zum Gedenken an die Verstorbenen zu erheben. Danke, dass Sie sich von Ihren Plätzen erhoben haben. Den Verstorbenen werden wir ein ehrendes Gedenken bewahren.

Zuwahlen und personeller Stand

Die BWG ist eine Gelehrten-gesellschaft, die nach Struktur und Zielsetzung den Akademien der Wissenschaft analog ist und die über das sogenannte Selbstergänzungsrecht verfügt. Dieses Recht auf Zuwahl gibt uns die Möglichkeit, Lücken im Fächerspektrum zu schließen und auch, dem stetigen Wandel der Wissenschaften folgend, neue Themenbereiche für uns zu gewinnen.

Gewählt wurden im Berichtszeitraum – der Zeitraum zwischen der letzten Jahresversammlung am 29. April 2022 bis zum 21. April 2023 – zu ordentlichen Mitgliedern

Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke, TU Braunschweig, für das Fachgebiet Baustoffe in die Klasse für Ingenieurwissenschaften;

Prof. Dr.rer.nat. Uwe Morgner, Leibniz Universität Hannover, für das Fachgebiet Laserphysik in die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften;

Prof. Dr.-Ing. Udo Nackenhorst, Leibniz Universität Hannover, für das Fachgebiet Baumechanik in die Klasse für Ingenieurwissenschaften.

In der BWG bringen wir in der Jungen BWG Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler aus Niedersachsen zusammen, um sie in einem besonderen Netzwerk wissenschaftlich zu fördern und in ihrem beruflichen Werdegang zu unterstützen. In die Junge BWG wurden im Berichtszeitraum aufgenommen:

Dr. Jacob Blumenfeld, Universität Oldenburg, Fachgebiet Praktische Philosophie;

Dr. Esther Greussing, TU Braunschweig, Fachgebiet Kommunikationswissenschaft;

Dr. Aidin Lak, TU Braunschweig, Fachgebiet Magnetische Nanopartikel;

Prof. Dr. Jonny Proppe, TU Braunschweig, Fachgebiet Computergestütztes Materialdesign;

Dr. Michael Zopf, Leibniz Universität Hannover, Fachgebiet Festkörperphysik.

Damit gehören aktuell zur BWG 150 ordentliche Mitglieder, davon 69 unter 70 Jahren, 60 korrespondierende Mitglieder und 29 Mitglieder der Jungen BWG.

Im Berichtszeitraum gab es auf der Leitungsebene vor allem Veränderungen bei der Jungen BWG. Aufgrund von Wegberufungen des vorherigen Vorstands wurde am 4. November 2022 der komplette Vorstand neu gewählt. 1. Sprecher ist nun Dr. Felix Kaspar, 1. Stellvertretende Sprecherin Professorin Stephanie Kroker,

2. Stellvertretende Sprecherin Dr. Frederike Hendriks und Medienmanager ist Professor Ulrich Römer, alle TU Braunschweig.

In der Klasse für Geisteswissenschaften wurde Professor Peter Burschel am 10.02.2023 als Klassenvorsitzender wiedergewählt. Die Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften wählte Professorin Petra Mischnik zu ihrer Transdisziplinaritätsbeauftragten. Das Amt des Präsidenten der BWG übernahm ab dem 01.01.2023 der Vortragende. Die Wahl fand am 16.12.2022 statt. Er löste seinen sehr geschätzten Vorgänger Professor Otto Richter in diesem Amt ab.

Zur Zielsetzung der BWG

Was sind die Ziele der BWG? Um diese zu beschreiben, möchte ich aus unserer neuen Satzung¹ zitieren, die durch Genehmigung des Ministeriums für Wissenschaft und Kultur am 15. Februar 2023 in Kraft trat.

Dort steht in der Präambel: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (BWG) ist eine Vereinigung von Gelehrten. Sie hat zum Ziel, sich forschend, fördernd und vermittelnd mit den gesamtgesellschaftlichen Leistungen von Wissenschaft und Technik in einem steten interdisziplinären Diskurs auseinanderzusetzen. So trägt sie zur Bildung einer wissensorientierten Gesellschaft bei. Dabei sind die Technikwissenschaften sowohl mit den Naturwissenschaften und der Mathematik als auch mit den Geistes- und Sozialwissenschaften transdisziplinär verbunden. Das integrative Zusammenwirken ermöglicht die Transformation von akademischem zu beratungsorientiertem Wissen. Die Arbeit der BWG ist zielorientiert und wertebasiert. Ihre Mitglieder pflegen den fächerübergreifenden Dialog. ...“.

Und in § 1 wird festgehalten: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft dient der Förderung der Wissenschaften und ihrer Zusammenarbeit. Sie kooperiert mit anderen Wissenschafts- und Bildungsinstitutionen und unterstützt die öffentliche Teilhabe an Forschung und Entwicklung. Mit der Expertise ihrer Mitglieder steht sie Politik und Medien als Ansprechpartnerin zur Verfügung. Sie fördert junge Wissenschaftlerinnen und junge Wissenschaftler. Sie verleiht Auszeichnungen für erfolgreiche wissenschaftliche Leistungen.“.

¹ Satzung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft. <http://bwg-nds.de/über-die-bwg/satzung-und-geschäftsordnungen/>, zuletzt zugegriffen am 14.04.2023.

Die zentrale Aufgabe der BWG

Und wie bildet die BWG diese Ziele in Aufgaben, in Aktivitäten ab?

Bei weitem nicht die einzige, aber doch die zentrale Aufgabe der BWG ist die Pflege des fächerübergreifenden Dialogs und die Wissensvermittlung. Dazu gehören der interne fachliche Austausch, die öffentlichen Veranstaltungen, die fächerübergreifenden Arbeiten zu wichtigen Themen und die Preisverleihungen. Über einige dieser Aufgaben möchte ich noch kurz berichten.

Gleich vorab: Weitere Informationen finden Sie auf den BWG-Webseiten oder in den BWG-Jahrbüchern, auf deren Online-Fassungen auch über die Webseiten zugegriffen werden kann. Und ebenfalls vorab: Viele sind an den Aktivitäten beteiligt, über die ich hier berichten darf, auch an der heutigen Veranstaltung. Mein herzlicher Dank geht an alle Beteiligten!

Der interne fachliche Austausch

Zum internen fachlichen Austausch. Dieser geschieht vor allem über Vorträge und Diskussionen, aber auch durch Besichtigungen und Exkursionen. Und er geschieht häufig über die jeweiligen Fachgrenzen hinweg. Dieser fachliche Austausch hilft, neue Perspektiven zu wichtigen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Themen zu gewinnen. Und er hilft auch, methodische Ansätze aus anderen Fachgebieten besser zu verstehen und die methodischen Ansätze des eigenen Fachgebiets noch intensiver zu reflektieren.

Dieser Austausch geschieht vor allem, aber bei weitem nicht nur, in den Sitzungen der drei Klassen – Geisteswissenschaften, Ingenieurwissenschaften sowie Mathematik und Naturwissenschaften –, in denen der Jungen BWG und in den gemeinsamen Plenarversammlungen. Die Treffen finden überwiegend in Räumlichkeiten der BWG in Braunschweig statt, aber auch, beispielsweise, in Räumlichkeiten der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der Leibniz Universität Hannover.

In dem Berichtszeitraum gab es 7 Plenarversammlungen, 11 Klassensitzungen und 4 Sitzungen der Jungen BWG.

Auf die Inhalte der Vorträge kann ich hier nicht eingehen. Aber wenigstens einige der Vortragstitel, alphabetisch sortiert, möchte ich Ihnen nennen:

- A) „Abwasser als Ressource?“,
- B) „Braunschweig, Lübeck und die Hanse. Zwischen Kooperation und hegemonialer Ordnung“,
- C) „Computational Biology – Mathematische Modellierung und Simulation der Proteinbiosynthese“,

- D) „Die Medizininformatik-Initiative: Gesundheitsdaten besser nutzen“,
- E) „Entwicklung eines COVID-19-Antikörpers: Vom Start in Insektenzellen bis hin zu klinischen Studien“,
- ...
- V) Veränderungen und Wirkungen des Meeresspiegelanstiegs – Strategien und Maßnahmen zur Anpassung des Küstenraums,
- W) Wasserstoff – Baustein der Energiewende.

Seit 2012 halten die Göttinger Akademie und die BWG auch gemeinsame Sitzungen ab, die seitdem wechselseitig in Göttingen und in Braunschweig durchgeführt werden. Im Berichtszeitraum fand diese gemeinsame Sitzung am 11. November 2022 in Braunschweig statt, mit zwei Vorträgen zum Thema Ursprünge des Lebens. Aus zwei unterschiedlichen Fachrichtungen – geowissenschaftlichen und organischer Chemie wurde vorgetragen über „Archaische Biosignaturen: Fossilien früher mikrobieller Gemeinschaften?“ und über „Annäherungen an den Ursprung des Lebens – von der präbiotischen Chemie zu den ersten Formen des Lebens“.

Die öffentlichen Veranstaltungen

Ich komme zu den öffentlichen Veranstaltungen. Zu den öffentlichen Veranstaltungen gehört die Vortragsreihe der Akademievorträge im Schloss. Wichtige Elemente dieses Formats sind der Vortragsort – Roter Saal im Zentrum der Stadt – und die Kooperation mit dem Kulturinstitut der Stadt Braunschweig. Das Thema der letzten Vorlesungsreihe war „In Bewegung: Technologischer Wandel und Gesellschaft“. In 7 Vorträgen wurden unterschiedliche Aspekte des Wechselspiels von gesellschaftlicher Entwicklung und technischen Entwicklungsprozessen besprochen und diskutiert. Hinweisen möchte ich an dieser Stelle auch auf das Thema der kommenden Vortragsreihe. Es lautet „Mobilität der Zukunft: bedarfsgerecht, sicher und nachhaltig“.

Eine weitere Vortragsreihe findet im Wolfsburger phäno statt. Diese veranstaltet die BWG gemeinsam mit der Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, in der Regel zu Themen, in denen im phäno zeitgleich eine Ausstellung stattfindet. In der Vortragsreihe des Berichtszeitraums lautete das Thema „Wahrnehmung“, das in vier Vorträgen aus so verschiedenen Perspektiven wie Musikwissenschaft, Robotik, Psychologie und Neurobiologie besprochen wurde. Auch hier ein Ausblick auf die kommende Veranstaltung: Dort wird es um das Thema ‚Energiewende‘ gehen.

Ein weiteres Vortragsformat der BWG sind die Bioethik-Symposien, in denen im Haus der Wissenschaft in Braunschweig an einem Nachmittag mit in der Regel

vier Vorträgen ein wichtiges und aktuelles Thema aus der biomedizinischen Ethik behandelt wird. Im Berichtszeitraum befasste sich das Bioethik-Symposium mit mRNA-Arzneimitteln, von denen ja besonders die mRNA-basierten Impfstoffe zu COVID-19 in der öffentlichen Diskussion standen. Das diesjährige Bioethik-Symposium wird sich dem Thema Umwelt und Gesundheit widmen.

Zu erwähnen ist noch die Neujahrsitzung der BWG, die am 28. Januar stattgefunden hat. Das dortige Thema lautete „Maschinen außer Kontrolle? Wie wir KI durch Interdisziplinarität in unser Leben integrieren können“.

Die fächerübergreifenden Arbeiten

Die fächerübergreifenden Arbeiten der BWG geschehen in der Regel in unseren Kommissionen und Querschnittsbereichen. Hier möchte ich exemplarisch die SYnENZ-Kommission nennen, die sich seit mehreren Jahren fächerübergreifend mit dem Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz befasst. Ihr vollständiger Name: Synergie und Intelligenz: technische, ethische und rechtliche Herausforderungen des Zusammenwirkens lebender und nicht lebender Entitäten im Zeitalter der Digitalisierung.

Im Berichtszeitraum fanden nicht nur interne Treffen statt, die sogenannten SYnENZ-Zirkel. Am 15. und 16. Februar veranstaltete die BWG gemeinsam mit der TU Braunschweig das von der SYnENZ-Kommission organisierte 2. Symposium über das Zusammenwirken von natürlicher und künstlicher Intelligenz mit dem Themenschwerpunkt: Beurteilen, Messen und Bewerten erweiterten Zusammenwirkens.

Dies übrigens in einem typischen Format: Die Sitzungen im Haus der Wissenschaft dienen dem wissenschaftlichen Austausch. Zudem gab es jedoch wieder eine öffentliche Abendveranstaltung in der Dornse, mit zwei Vorträgen, die das Thema Künstliche Intelligenz aus Sicht der Robotik und aus Sicht der Sozialwissenschaften behandelten.

Preisverleihungen

Zum Abschluss möchte ich in meinem Bericht die Preisverleihungen ansprechen.

Den Abt Jerusalem-Preis für herausragende Beiträge zum Dialog der Geistes-, Natur- und Technikwissenschaften erhielt im Berichtszeitraum am 24. Juni 2022 Frau Professorin Katharina Zweig von der TU Kaiserslautern. Dieser Preis wird, wie schon in meiner Begrüßung erwähnt, gemeinsam von der Evangelisch-Lutherischen Landeskirche in Braunschweig, der TU Braunschweig der Stiftung

Braunschweiger Kulturbesitz, und der BWG verliehen. Vor dem abendlichen Festakt mit Preisverleihung in der Klosterkirche Riddagshausen fand am Nachmittag wieder ein Preis-Kolloquium statt, diesmal mit fünf Vorträgen zum Thema „Das Menschenbild der künstlichen Intelligenz“.

Dass die BWG seit 1949 die Carl Friedrich Gauß-Medaille für herausragende wissenschaftliche Leistungen verleiht, – heute an Sie, Frau Professorin Viazovska, hatte ich ebenfalls bei meiner Begrüßung gesagt. Diese Festveranstaltung, diese Preisverleihung, die Vorträge an dem heutigen Tag, dem 21. April 2023, bilden den würdigen Abschluss des Berichtsjahres, über das ich sie, meine sehr geehrten Damen und Herren, informieren durfte. Der Kreis schließt sich – wir sind wieder bei der Verleihung der Carl Friedrich Gauß-Medaille. Ich darf mich für Ihre Aufmerksamkeit bedanken und darf die Moderation jetzt an Herrn Kollegen Hulek übergeben.

Laudatio für Maryna Viazovska

Anlässlich der Verleihung der Gauß-Medaille durch die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Jürg Kramer*

21. April 2023

1 Kugelpackungen

Zur Würdigung der wissenschaftlichen Leistung von Maryna Viazovska heißt es: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft verleiht die Gauß-Medaille an Maryna Viazovska für Ihre herausragenden Beiträge zur Theorie der Kugelpackungen in höheren Dimensionen und zu anderen Extremalproblemen. Dank ihrer Ideen konnte das Problem der dichtesten Kugelpackung in Dimension 8 vollständig gelöst werden. Gemeinsam mit ihren Koautoren gelang Frau Viazovska zudem die Lösung des Problems in Dimension 24. Ihre Entdeckungen stehen in direkter Nachfolge zu den entsprechenden Arbeiten von Carl Friedrich Gauß.“

Im Folgenden sollen die bahnbrechenden Errungenschaften von Maryna Viazovska zu Kugelpackungen in höheren Dimensionen möglichst allgemein verständlich vorgestellt werden. Dabei stützen wir uns auch auf die empfehlenswerten Ausführungen [1], [2] von Henry Cohn.

Wir beginnen mit dem Begriff der Kugelpackung (siehe z. B. [5]). Eine *Kugelpackung* des 3-dimensionalen Raumes \mathbb{R}^3 ist eine Anordnung gleich großer Kugeln, die sich höchstens berühren.



Abb. 1: Hexagonale Kugelpackung im \mathbb{R}^3 (Photo: Sunny for Getty Images)

Wir sprechen von einer *dichtesten Kugelpackung*, wenn die Anordnung der entsprechenden Kugeln den \mathbb{R}^3 mit möglichst kleinen Zwischenräumen ausfüllt. Diese beiden Begriffsbildungen lassen sich in natürlicher Weise auch auf die Räume \mathbb{R}^d einer beliebigen Dimension d übertragen.

*The author acknowledges support from the DFG Cluster of Excellence MATH+.

Es stellt sich somit die Aufgabe, die dichtesten Kugelpackungen des \mathbb{R}^d für die Dimensionen $d = 1, 2, 3, \dots$ zu bestimmen. Dabei erhalten wir die Dichte δ einer Kugelpackung, indem wir einen Würfel der Seitenlänge ℓ im \mathbb{R}^d betrachten, in den wir so viele Kugeln der entsprechenden Kugelpackung wie möglich packen, und dann das Verhältnis des Volumens all' dieser Kugeln zum Würfelvolumen ℓ^d für immer größer werdendes ℓ , genauer gesagt, den Grenzwert $\ell \rightarrow \infty$, bestimmen. Damit besteht unsere Aufgabe also darin, unter allen möglichen Kugelpackungen eine zu finden, die maximale Dichte besitzt. Bei der Lösung unserer Aufgabe kommt erschwerend dazu, dass es nicht klar ist, ob die gesuchte dichteste Kugelpackung von einer regelmäßigen oder unregelmäßigen Anordnung der betrachteten Kugeln im \mathbb{R}^d kommt. Obwohl, wie wir gleich sehen werden, die dichteste Kugelpackung in den Dimensionen $d = 2$ und $d = 3$ durch regelmäßige Anordnungen der Kugeln gegeben sind, gibt es auch Dimensionen, in denen dies nicht der Fall ist.

2 Gitter-Kugelpackungen

Kugelpackungen mit regelmäßig angeordneten Kugeln erhält man mit Hilfe von sogenannten Gitter-Kugelpackungen, die wir jetzt beschreiben wollen. Dazu nennen wir eine Teilmenge $\Lambda \subset \mathbb{R}^d$, die durch alle ganzzahligen Linearkombinationen von d linear unabhängigen Vektoren v_1, \dots, v_d des \mathbb{R}^d gegeben ist, ein *Gitter*; in Formeln

$$\Lambda = \mathbb{Z} \cdot v_1 + \dots + \mathbb{Z} \cdot v_d.$$

Das von den Basisvektoren v_1, \dots, v_d aufgespannte Paralleloptop, d. h. die Menge

$$\{\alpha_1 \cdot v_1 + \dots + \alpha_d \cdot v_d \mid 0 \leq \alpha_1, \dots, \alpha_d \leq 1\},$$

wird die *Fundamentalmasche* von Λ genannt und mit \mathcal{F}_Λ bezeichnet.

Die roten Punkte des nachfolgenden Bildes zeigen das 2-dimensionale quadratische Gitter, das durch die beiden Einheitsvektoren $v_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ und $v_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ im \mathbb{R}^2 aufgespannt wird.

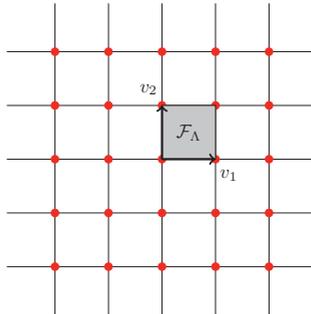


Abb. 2: 2-dim. quadratisches Gitter

Die Fundamentalmasche \mathcal{F}_Λ ist in diesem Fall ein Quadrat.

Es liege nun ein Gitter $\Lambda \subset \mathbb{R}^d$ vor. Dazu können wir wie folgt eine regelmäßige Kugelpackung konstruieren: Wir suchen zunächst nach den vom Nullvektor verschiedenen Vektoren $x \in \Lambda$, die kürzeste Länge $\|x\|$ haben, und wählen r dann als die Hälfte dieser Länge, d. h. wir setzen

$$r = \frac{1}{2} \cdot \min\{\|x\| \mid x \in \Lambda, x \neq 0\}.$$

Indem wir jetzt Kugeln vom Radius r an den Gitterpunkten von Λ platzieren, erhalten wir die gewünschte regelmäßige Kugelpackung, die wir die *Gitter-Kugelpackung zum Gitter Λ* nennen.

Für das zuvor betrachtete Beispiel des 2-dimensionalen quadratischen Gitters erkennt man sofort, dass die Länge der kürzesten Gittervektoren 1 ist und somit $r = 1/2$ gilt. Die dazugehörige Gitter-Kugelpackung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

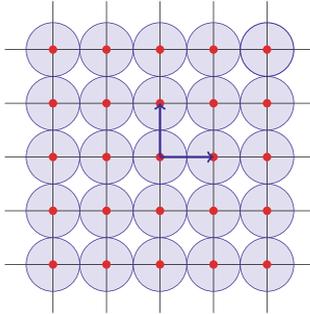


Abb. 3: Kugelpackung zum 2-dim. quadratischen Gitter

Aufgrund der Regelmäßigkeit einer Gitter-Kugelpackung benötigt man zur Berechnung ihrer Dichte δ keinen Grenzwertprozess wie im allgemeinen Fall, man hat lediglich das Verhältnis des Volumens der betrachteten Kugeln zum Volumen der Gittermasche zu bilden. Bezeichnet $B_d(r)$ eine Kugel vom Radius r im \mathbb{R}^d , so ist ihr Volumen durch die Formel

$$\text{vol}(B_d(r)) = \frac{\pi^{d/2} \cdot r^d}{(d/2)!}$$

gegeben, wobei $(d/2)! = \Gamma(d/2 + 1)$ mit der Eulerschen Gammafunktion gilt, wenn d ungerade ist. Damit berechnet sich die Dichte δ der betrachteten Gitter-Kugelpackung einfach zu

$$\delta = \frac{\text{vol}(B_d(r))}{\text{vol}(\mathcal{F}_\Lambda)} = \frac{\pi^{d/2} \cdot r^d}{(d/2)!} \cdot \frac{1}{\text{vol}(\mathcal{F}_\Lambda)}$$

Für das Beispiel der Kugelpackung zum 2-dimensionalen quadratischen Gitter ergibt sich somit als Dichte

$$\delta = \frac{\pi \cdot (1/2)^2}{1!} \cdot \frac{1}{1} = \frac{\pi}{4} \approx 0,78539 \dots,$$

d. h. die betrachtete Gitter-Kugelpackung füllt ca. 78% der Ebene aus.

3 Dichteste Kugelpackungen für $d = 1, 2, 3$

Ist $d = 1$, so hat die dichteste Kugelpackung die Dichte $\delta = 1$. Dies erkennt man sofort, indem man das 1-dimensionale Gitter auf der reellen Zahlengeraden \mathbb{R} betrachtet, das durch den Einheitsvektor $v_1 = 1$ aufgespannt wird. Die entsprechende 1-dimensionale „Kugel“ füllt die Fundamentalmasche dieses Gitters, die nichts anderes als das Einheitsintervall ist, vollständig aus.

Ist $d = 2$, so hat die zuvor betrachtete Kugelpackung zum 2-dimensionalen quadratischen Gitter nicht maximale Dichte. Man überzeugt sich nämlich leicht, dass die Kugelpackung zum 2-dimensionalen hexagonalen Gitter eine größere Dichte hat.

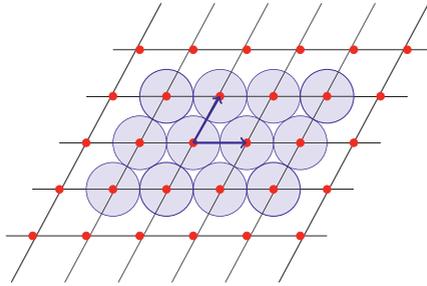


Abb. 4: Kugelpackung zum 2-dim. hexagonalen Gitter

Da auch im Fall der Kugelpackung zum 2-dimensionalen hexagonalen Gitter $r = 1/2$ gilt, aber das Volumen der Fundamentalmasche hier durch $\sqrt{3}/2$ gegeben ist, ergibt sich deren Dichte zu

$$\delta = \frac{\pi \cdot (1/2)^2}{1!} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}/2} = \frac{\pi}{\sqrt{12}} \approx 0,90689 \dots,$$

d. h. die Kugelpackung zum 2-dimensionalen hexagonalen Gitter deckt mehr als 90% der Ebene ab.

Bereits 1773 bewies Joseph-Louis Lagrange, dass die Kugelpackung zum 2-dimensionalen hexagonalen Gitter unter allen Gitter-Kugelpackungen die dichteste ist. Es dauerte allerdings mehr als 100 Jahre bis Axel Thue im Jahr 1892 mit seiner Arbeit [8] beweisen konnte, dass die Kugelpackung zum 2-dimensionalen hexagonalen Gitter unter *allen* Kugelpackungen der Ebene die dichteste ist.

Wenden wir uns nun dem Fall $d = 3$ zu: In diesem Fall ist man als erstes zur Kugelpackung zum 3-dimensionalen kubischen Gitter mit $r = 1/2$ und Fundamentalmaschenvolumen 1 geführt,

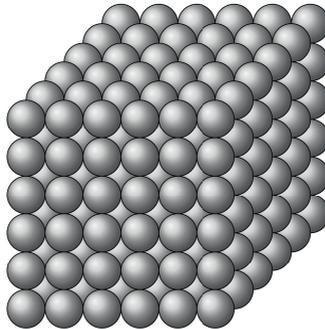


Abb. 5: Kugelpackung zum 3-dim. kubischen Gitter

was zur Dichte

$$\delta = \frac{\pi^{3/2} \cdot (1/2)^3}{3 \sqrt{\pi}/4} \cdot \frac{1}{1} = \frac{\pi}{6} \approx 0,52359 \dots$$

führt. Es wurde aber bereits im Jahr 1611 von Johannes Kepler vermutet, dass die Kugelpackung zum 3-dimensionalen hexagonalen Gitter mit $r = 1/2$ und Fundamentalmaschenvolumen $\sqrt{2}/2$

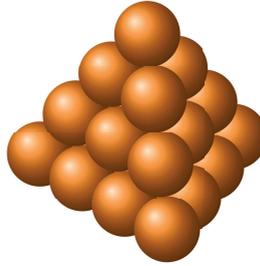


Abb. 6: Kugelpackung zum 3-dim. hexagonalen Gitter

mit der Dichte

$$\delta = \frac{\pi^{3/2} \cdot (1/2)^3}{3 \sqrt{\pi}/4} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}/2} = \frac{\pi}{\sqrt{18}} \approx 0,74048\dots$$

unter allen 3-dimensionalen Kugelpackungen die dichteste ist. Carl Friedrich Gauß bewies 1831 die Kepler-Vermutung für Gitter-Kugelpackungen. Es vergingen mehr als 150 Jahre, bis Thomas Hales im Jahr 1998 einen Computerbeweis vorlegte, der die Kepler-Vermutung vollständig löste. Allerdings vergingen sieben weitere Jahre, bis dieser Beweis geprüft war, so dass er in [6] erscheinen konnte. Bis zum Jahr 2016 waren keine dichteste Kugelpackungen in Dimensionen $d > 3$ bekannt.

4 Maryna Viazovskas Durchbruch

Zur Überraschung der mathematischen Öffentlichkeit gelang es Maryna Viazovska im Jahr 2016 die dichteste Kugelpackung in Dimension $d = 8$ zu bestimmen.

Diese geht, wie in den Dimensionen $d = 1, 2, 3$, wiederum aus einer Gitter-Kugelpackung hervor. Das dafür benötigte Gitter in \mathbb{R}^8 ist das sogenannte Gitter E_8 , welches durch

$$E_8 = \left\{ (x_1, \dots, x_8) \in \mathbb{R}^8 \mid \begin{array}{l} x_1, \dots, x_8 \text{ ganzzahlig oder } x_1, \dots, x_8 \text{ halbganz:} \\ \text{die Summe } x_1 + \dots + x_8 \text{ ist gerade} \end{array} \right\}$$

gegeben ist. Das Gitter E_8 ist ein sogenanntes gerades und unimodulares Gitter. Es taucht in vielen Gebieten der Mathematik, wie zum Beispiel in der Darstellungstheorie, der Codierungstheorie, der Topologie oder der Zahlentheorie, auf. Es ergibt sich

$$r = \frac{1}{2} \cdot \min\{\|x\| \mid x \in E_8, x \neq 0\} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Aufgrund der Unimodularität hat die Fundamentalmasche von E_8 das Volumen 1. Damit können wir das erste Hauptresultat von Maryna Viazovska formulieren.

Erstes Hauptergebnis (M. Viazovska [9]). *Die dichteste Kugelpackung in Dimension $d = 8$ ist die Gitter-Kugelpackung zum Gitter E_8 mit der Dichte*

$$\delta = \frac{\pi^{8/2} \cdot (\sqrt{2}/2)^8}{(8/2)!} \cdot \frac{1}{1} = \frac{\pi^4}{384} \approx 0,25367\dots$$

Somit füllt die dichteste Kugelpackung lediglich ca. 25% des 8-dimensionalen Raumes aus!

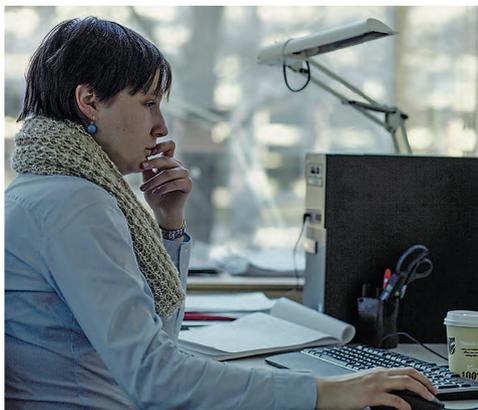


Abb. 7: Maryna Viazovska (Photo: Daniil Yevtushynsky)

Zweites Hauptergebnis (M. Viazovska mit H. Cohn, A. Kumar, S. D. Miller, D. Radchenko [4]). Die dichteste Kugelpackung in Dimension $d = 24$ ist die Gitter-Kugelpackung zum Leech-Gitter Λ_{24} mit der Dichte

$$\delta = \frac{\pi^{12}}{12!} \approx 0,00192 \dots$$

Damit füllt die dichteste Kugelpackung nur ca. 2‰ des 24-dimensionalen Raumes aus!

Das Leech-Gitter Λ_{24} ist in Analogie zum Gitter E_8 auch gerade und unimodular mit kürzestem Gittervektor der Länge 2.

5 Beweisstrategie

Zum Beweis ihres ersten Hauptergebnisses knüpfte Maryna Viazovska an ein Ergebnis von Henry Cohn und Noam Elkies aus dem Jahr 2003 an. Um dieses Resultat zu beschreiben, benötigen wir die folgenden Begriffsbildungen:

- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *schnell abfallend*, falls für jede Konstante $c > 0$ die Abschätzung $f(x) = O(\|x\|^{-c})$ gilt, sobald $\|x\| \rightarrow \infty$ strebt.
- Eine Funktion $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *Schwartz-Funktion*, falls f unendlich oft stetig differenzierbar ist und alle ihre partiellen Ableitungen schnell abfallend sind.
- Die *Fourier-Transformierte* einer Schwartz-Funktion $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ ist definiert durch die Formel

$$\widehat{f}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i(x,y)} dx_1 \dots dx_d \quad (y \in \mathbb{R}^d).$$

Das einleitend genannte Ergebnis von Henry Cohn und Noam Elkies ist durch den folgenden Satz gegeben.

Satz (H. Cohn, N. Elkies [3]). Es sei $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ eine gerade Schwartz-Funktion und r eine positive reelle Zahl. Falls gilt:

$$(1) f(x) \leq 0 \text{ für alle } x \in \mathbb{R}^d \text{ mit } \|x\| \geq r,$$

$$(2) \widehat{f}(y) \geq 0 \text{ für alle } y \in \mathbb{R}^d,$$

$$(3) f(0) = \widehat{f}(0) = 1,$$

dann ist die maximale Dichte δ einer Kugelpackung im \mathbb{R}^d nach oben beschränkt durch die Zahl

$$\frac{\pi^{d/2} \cdot (r/2)^d}{(d/2)!}.$$

Dieses Ergebnis kann bei der Suche nach einer Kugelpackung im \mathbb{R}^d mit maximaler Dichte wie folgt angewendet werden: Kennt man eine Kugelpackung und deren Dichte δ im \mathbb{R}^d und findet andererseits eine gerade Schwartz-Funktion $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ sowie eine positive reelle Zahl r , so dass die Gleichheit

$$\delta = \frac{\pi^{d/2} \cdot (r/2)^d}{(d/2)!}$$

gilt, dann weiss man, die bekannte Kugelpackung maximale Dichte hat. Aus diesem Grund spielt die Konstruktion einer geraden Schwartz-Funktion $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ sowie der dazugehörigen positiven reellen Zahl r eine entscheidende Rolle bei der Suche nach Kugelpackungen im \mathbb{R}^d mit maximaler Dichte. Aus diesem Grund wird eine solche Schwartz-Funktion f mit den Eigenschaften (1)–(3) eine *magische Funktion* genannt.

Für den Beweis ihres ersten Hauptergebnisses gelang Maryna Viazovska für die Dimension $d = 8$ die bahnbrechende Entdeckung einer magischen Funktion $f: \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}$ mit zugehörigem $r = \sqrt{2}$. Nach dem Satz von Henry Cohn und Noam Elkies muss damit die maximale Dichte einer Kugelpackung im \mathbb{R}^8 durch die Zahl

$$\frac{\pi^{8/2} \cdot (\sqrt{2}/2)^8}{(8/2)!} = \frac{\pi^4}{3 \cdot 2^7} = \frac{\pi^4}{384}$$

beschränkt sein. Auf der anderen Seite wissen wir aber, dass die Gitter-Kugelpackung zum Gitter E_8 genau diese Dichte besitzt. Somit hat diese Kugelpackung maximale Dichte.

Eine wunderbare Würdigung der Leistung von Maryna Viazovka wird durch das nachfolgende Zitat von Henry Cohn in [2] wiedergegeben:

“When Elkies and I proposed this method in 1999, Viazovska was still in secondary school. Without realizing how profoundly difficult the remaining step was, I imagined that we had almost solved the sphere packing problem in eight and twenty-four dimensions, and our inability to find the magic functions was extremely frustrating. At first, I worried that someone else would find an easy solution and leave me feeling foolish for not doing it myself. Over time I became convinced that obtaining these functions was in fact difficult ... Eventually, instead of worrying that someone else would solve it, I began to fear that nobody would solve it, and that I would someday die without knowing the outcome...”

Im letzten Teil unserer Würdigung der Arbeiten von Maryna Viazovska wollen wir nun etwas genauer auf die Konstruktion der oben erwähnten magischen Funktion eingehen. Dazu müssen wir uns zuerst aber mit dem Begriff einer Modulform vertraut machen, was wir im nächsten Abschnitt tun wollen.

6 Modulformen

Es ist nicht ganz einfach, einer allgemeinen akademischen Öffentlichkeit den Begriff einer „Modulform“ vorzustellen. Lassen Sie es uns dennoch versuchen, Modulformen zu verstehen. Dazu erinnern wir an ein einfaches Analogon, das aus der Schulzeit bekannt sein sollte.

Wir suchen nach reellwertigen Funktionen $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, die 1-periodisch und gerade sind, d. h. Funktionen, welche für alle $x \in \mathbb{R}$ den beiden Funktionalgleichungen

$$f(x + 1) = f(x) \quad \text{und} \quad f(-x) = f(x)$$

genügen. Etwas mathematischer formuliert, betrachten wir die auf \mathbb{R} operierende diskrete Gruppe Γ , die durch die Translation um 1 und die Spiegelung am Nullpunkt erzeugt wird. Somit suchen wir nach den

reellwertigen Funktionen, die unter der Wirkung von Γ *invariant* sind. Beispiele solcher Funktionen sind mit Hilfe trigonometrischer Funktionen leicht anzugeben, beispielsweise erfüllen die beiden Funktionen

$$f(x) = \cos(2\pi x) \quad \text{oder} \quad f(x) = \sin^2(2\pi x)$$

die gewünschten Anforderungen. Um den Begriff einer Modulform einzuführen, gilt es nun die vorhergehenden Überlegungen in die komplexe Welt, auch hyperbolische Welt genannt, zu übertragen. Dazu betrachten wir anstelle der reellen Zahlengeraden die obere komplexe Halbebene, d. h.

$$\mathbb{H} = \{z \in \mathbb{C} \mid z = x + iy : x, y \in \mathbb{R}, y > 0\}.$$

Auf \mathbb{H} operiert die diskrete Gruppe Γ , welche durch die Translation um 1 und die sogenannte hyperbolische Spiegelung, d. h. durch die beiden Bewegungen

$$z \mapsto z + 1 \quad \text{und} \quad z \mapsto -\frac{1}{z} \quad (z \in \mathbb{H}),$$

erzeugt wird. In Analogie zu unserem einleitenden Beispiel suchen wir nun nach den komplexwertigen Funktionen $f: \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}$, welche unter der Wirkung von Γ invariant sind, d. h. welche für alle $z \in \mathbb{C}$ die beiden Funktionalgleichungen

$$f(z + 1) = f(z) \quad \text{und} \quad f\left(-\frac{1}{z}\right) = f(z)$$

erfüllen. Solche Funktionen werden *Modulformen vom Gewicht 0* zu Γ genannt.

Die Gruppe Γ lässt sich mit Hilfe der gebrochen linearen Transformationen genauer beschreiben; sie besteht nämlich aus allen Bewegungen der Art

$$z \mapsto \frac{az + b}{cz + d} \quad (z \in \mathbb{H}),$$

wobei $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}_2(\mathbb{Z})$ ist, d. h. eine (2×2) -Matrix mit ganzzahligen Einträgen und Determinante 1. Die Gruppe Γ wird *Modulgruppe* genannt. Mit Hilfe der Wirkung von Γ lassen sich die Punkte der oberen Halbebene \mathbb{H} in Äquivalenzklassen einteilen. Dabei sind zwei Punkte $z, w \in \mathbb{H}$ zueinander äquivalent, falls $w = (az + b)/(cz + d)$ mit $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}_2(\mathbb{Z})$ gilt.

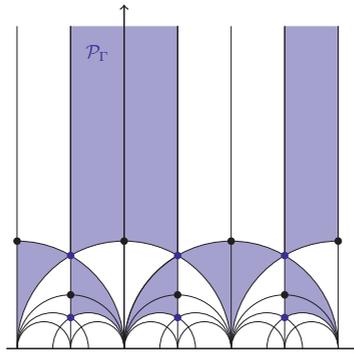


Abb. 8: Visualisierung von Fundamentalbereichen \mathcal{P}_Γ zu Γ (Bild: Anna Pippich)

Es zeigt sich nun, dass sich die obere Halbebene \mathbb{H} mit „Pflastersteinen“ \mathcal{P}_Γ , den sogenannten *Fundamentaltbereichen* zu Γ , derart lückenlos überdecken lässt, dass jeder dieser Pflastersteine genau einen Punkt aus den zuvor definierten Äquivalenzklassen enthält.

Unsere vorhergehende Definition von Modulformen vom Gewicht 0 zu Γ besagt also, dass es sich um komplexwertige (meromorphe) Funktionen $f: \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}$ handelt, welche für alle $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}_2(\mathbb{Z})$ und alle $z \in \mathbb{H}$ den Funktionalgleichungen

$$f\left(\frac{az + b}{cz + d}\right) = f(z) \tag{1}$$

genügen. Diese Funktionen sind also periodisch bezüglich der zuvor beschriebenen Pflasterung der oberen Halbebene.

Um endlich zum Begriff einer Modulform von höherem Gewicht zu kommen, bilden wir die komplexe Ableitung einer Modulform vom Gewicht 0 zu Γ und erhalten aus den Funktionalgleichungen (1) die Gleichungen

$$f'\left(\frac{az + b}{cz + d}\right)(cz + d)^{-2} = f'(z).$$

Dies motiviert die folgende Begriffsbildung: Es sei k eine natürliche Zahl; eine komplexwertige Funktion $f: \mathbb{H} \rightarrow \mathbb{C}$ heißt eine *Modulform vom Gewicht k* zu Γ , falls f holomorph ist und für alle $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \text{SL}_2(\mathbb{Z})$ und alle $z \in \mathbb{H}$ den Funktionalgleichungen

$$f\left(\frac{az + b}{cz + d}\right)(cz + d)^{-k} = f(z)$$

genügt. Da f insbesondere 1-periodisch ist, besitzt f eine Fourierreihe, von der man zusätzlich fordert, dass sie von der Form

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n e^{2\pi i n z}$$

ist, d. h. alle Fourierkoeffizienten a_n mit negativem n müssen verschwinden.

Wir illustrieren den Begriff einer Modulform anhand von zwei zahlentheoretisch motivierten Beispielen:

- (1) *Eisensteinreihen*: Für gerade natürliche Zahlen $k > 2$ betrachten wir die Reihen

$$E_k(z) = \frac{1}{2\zeta(k)} \sum_{\substack{(m,n) \in \mathbb{Z}^2 \\ (m,n) \neq (0,0)}} \frac{1}{(mz + n)^k},$$

wobei $\zeta(k)$ den Wert der Riemannschen Zetafunktion an der Stelle k bedeutet. Diese Reihen konvergieren absolut und lokal gleichmäßig für alle $z \in \mathbb{H}$. Es stellt sich heraus, dass sie Modulformen vom Gewicht k zu Γ sind, die sogenannten *Eisensteinreihen vom Gewicht k* .

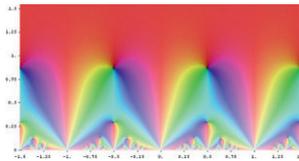


Abb. 9: Plot des Absolutbetrags der Eisensteinreihe $E_4(z)$ (Bild: Jan Homann)

Die Fourierkoeffizienten a_n von $E_k(z)$ haben arithmetische Bedeutung; für positive Indices n gilt nämlich

$$a_n = \frac{1}{\zeta(k)} \frac{(2\pi i)^k}{(k-1)!} \sum_{d|n} d^{k-1},$$

d. h. die Fourierkoeffizienten beinhalten die zahlentheoretisch interessanten Teilersummen $\sum_{d|n} d^{k-1}$.

(2) *Thetareihen*: Wir betrachten die Reihe

$$\vartheta(z) = \sum_{(n_1, \dots, n_4) \in \mathbb{Z}^4} e^{\pi i(n_1^2 + \dots + n_4^2)z}.$$

Es stellt sich heraus, dass $\vartheta(z)$ eine Modulform vom Gewicht 2, allerdings nicht zur Gruppe Γ , sondern zur Untergruppe

$$\Gamma(2) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma \mid a, d \text{ ungerade; } b, c \text{ gerade} \right\}$$

ist, d. h. die Thetareihe erfüllt für alle $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma(2)$ und alle $z \in \mathbb{H}$ die Funktionalgleichungen

$$\vartheta\left(\frac{az+b}{cz+d}\right)(cz+d)^{-2} = \vartheta(z).$$

Sie hat eine Fourierreiheentwicklung der Form

$$\vartheta(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n e^{\pi i n z},$$

d. h. $\vartheta(z)$ ist nicht 1-periodisch, sondern 2-periodisch. Die Fourierkoeffizienten b_n sind gegeben durch die Anzahl der Darstellungen einer natürlichen Zahl n als Summe von vier Quadratzahlen, also

$$b_n = \#\{(n_1, \dots, n_4) \in \mathbb{Z}^4 \mid n = n_1^2 + \dots + n_4^2\}.$$

Für ungerade natürliche Zahlen n gilt beispielsweise

$$b_n = 8 \cdot \sum_{d|n} d.$$

Damit schließen wir jetzt unsere Ausführungen zum Begriff einer Modulform; die interessierte Leserschaft kann der reichen Literatur zu Modulformen weitere Einzelheiten entnehmen, beispielsweise dem Buch [10]. Wir sind jetzt in der Lage Maryna Viazovska's geniale Konstruktion der magischen Funktion zu geben.

7 Konstruktion der magischen Funktion

Möglicherweise liess sich Maryna Viazovska bei der Konstruktion der magischen Funktion $f: \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}$ von Martin Eichlers Philosophie leiten, dass man mit Hilfe von Modulformen (fast) alles berechnen kann.



Abb. 10: Martin Eichler, 1912–1992 (Photo: Konrad Jacobs, Erlangen)

Martin Eichler, ein Pionier bei der Erforschung von Modulformen, sagte nämlich: „Neben der Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division bilden die Modulformen die fünfte Grundrechenart!“

Wir kommen nun zur Beschreibung der magischen Funktion $f: \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}$; dazu stellen wir zuerst zwei Hilfsfunktionen bereit.

- (1) Die Hilfsfunktion ψ : Mit Hilfe der Eisensteinreihen $E_k(z)$ ($k > 2$, gerade) führen wir zunächst die Modulform

$$\Delta(z) = \frac{1}{1728} (E_4^3(z) - E_6^2(z))$$

vom Gewicht 12 zu Γ ein. Mit der Thetareihe $\vartheta(z)$ und $\tilde{\vartheta}(z) = \vartheta(z+1)$ definieren wir damit die erste Hilfsfunktion durch

$$\begin{aligned} \psi(z) &= \frac{\tilde{\vartheta}^3(z)(5\vartheta^2(z) - 5\tilde{\vartheta}(z)\tilde{\vartheta}(z) + 2\tilde{\vartheta}^2(z))}{\Delta(z)} \\ &= 2q^{-1} + 288 - 10240q + 141048q^2 + \dots, \end{aligned}$$

wobei $q = e^{2\pi iz}$ gesetzt wurde.

- (2) Die Hilfsfunktion ϕ : Aus Gründen der absoluten Konvergenz war es für die Definition der Eisensteinreihen $E_k(z)$ nötig, $k > 2$ zu fordern. Es zeigt sich nun, dass es auch möglich ist, eine Eisensteinreihe $E_2(z)$ vom Gewicht 2 zu Γ zu definieren; dies geschieht durch Angabe ihrer Fourierentwicklung

$$E_2(z) = 1 - 24 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{d|n} d \right) q^n.$$

$E_2(z)$ ist allerdings keine Modulform vom Gewicht 2 zu Γ , denn sie erfüllt die Funktionalgleichung

$$E_2\left(-\frac{1}{z}\right) z^{-2} = E_2(z) - \frac{6i}{\pi z};$$

man spricht von einer *Quasi-Modulform vom Gewicht 2 zu Γ* . Damit lässt sich die zweite Hilfsfunktion in der Form

$$\phi(z) = \frac{(E_2(z)E_4(z) - E_6(z))^2}{\Delta(z)}$$

angeben.

Mit den beiden Hilfsfunktionen $\psi(z)$ und $\phi(z)$ können wir jetzt das zentrale Ergebnis von Maryna Viazovska wie folgt formulieren.

Hauptsatz (M. Viazovska [9]). Die magische Funktion $f: \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}$ zu $r = \sqrt{2}$ mit

- (1) $f(x) \leq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^8$ mit $\|x\| \geq r$,
- (2) $\hat{f}(y) \geq 0$ für alle $y \in \mathbb{R}^8$,
- (3) $f(0) = \hat{f}(0) = 1$,

ist gegeben durch

$$f(x) = 4 \sin^2(\pi \|x\|^2 / 2) \int_0^{\infty} \left(-t^2 \phi\left(\frac{i}{t}\right) + \psi(it) \right) e^{-\pi t \|x\|^2} dt$$

für $\|x\| \geq r = \sqrt{2}$.

Wir gratulieren Maryna Viazovska herzlich zur Verleihung der Gauß-Medaille durch die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft! Ihre Konstruktion der magischen Funktion stellt eine herausragende Leistung dar. Auch wenn das in ihrem ersten Hauptergebnis verwendete Gitter E_8 vielleicht eine Verbindung zur Welt der Modulformen hätte suggerieren können, ist die explizite Angabe der magischen Funktion in Termen von klassischen Modulformen ein mathematisches Meisterwerk.

Literatur

- [1] H. Cohn: *A conceptual breakthrough in sphere packing*. Notices Amer. Math. Soc. **64** (2017), no. 2, 102–115.
- [2] H. Cohn: *The work of Maryna Viazovska*. Proc. Int. Cong. Math. 2022, Vol. 1.
- [3] H. Cohn and N. Elkies: *New upper bounds on sphere packings I*. Ann. of Math. (2) **157** (2003), no. 2, 689–714.
- [4] H. Cohn, A. Kumar, S. D. Miller, D. Radchenko, and M. Viazovska: *The sphere packing problem in dimension 24*. Ann. of Math. (2) **185** (2017), no. 3, 1017–1033.
- [5] J. H. Conway and N. J. A. Sloane: *Sphere Packings, Lattices and Groups*. Third edition, Grundlehren der Mathematischen Wissenschaften **290**. Springer-Verlag, New York, 1999.
- [6] T. C. Hales: *A proof of the Kepler conjecture*. Ann. of Math. (2) **162** (2005), no. 3, 1065–1185.
- [7] D. Radchenko and M. Viazovska: *Fourier interpolation on the real line*. Publ. Math. Inst. Hautes Études Sci. **129** (2019), 51–81.
- [8] A. Thue: *Om nogle geometrisk-taltheoretiske Theoremer*. Forhandlingerne ved de Skandinaviske Naturforskere **14** (1892), 352–353.
- [9] M. Viazovska: *The sphere packing problem in dimension 8*. Ann. of Math. (2) **185** (2017), no. 3, 991–1015.
- [10] D. Zagier: *Elliptic modular forms and their applications*. In *The 1–2–3 of Modular Forms* (K. Rastad, ed.), pp. 1–103. Universitext. Springer, Berlin, 2008.

Jürg Kramer
 Institut für Mathematik
 Humboldt-Universität zu Berlin
 Unter den Linden 6
 10099 Berlin
 Germany
 kramer@math.hu-berlin.de

DIE BRAUNSCHWEIGISCHE WISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

verleiht die

CARL FRIEDRICH GAUSS-MEDAILLE

FRAU
PROFESSORIN DR.
MARYNA VIAZOVSKA

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE, CHAIRE D'ARITHMETIQUE

FÜR IHRE HERAUSRAGENDEN BEITRÄGE ZUR THEORIE DER KUGELPACKUNGEN IN HÖHEREN DIMENSIONEN UND ZU ANDEREN EXTREMALPROBLEMEN. DANK IHRER IDEEN KONNTE DAS PROBLEM DER DICHTESTEN KUGELPACKUNG IN DIMENSION 8 VOLLSTÄNDIG GELÖST WERDEN. GEMEINSAM MIT IHREN KOAUTOREN GELANG FRAU VIAZOVSKA ZUDEM DIE LÖSUNG DES PROBLEMS IN DIMENSION 24. IHRE ENTDECKUNGEN STEHEN IN DIREKTER NACHFOLGE ZU DEN ENTSPRECHENDEN ARBEITEN VON CARL FRIEDRICH GAUSS.

Braunschweig, den 21. April 2023



Prof. Dr. Reinhold Haux
Präsident
der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft

SYMPOSIEN UND KOLLOQUIEN

2. SYnENZ-Symposium Beurteilen – Messen – Bewerten

Veranstaltungstage: 15. und 16. Februar 2023

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft TU
Braunschweig

Veranstaltungsort: Haus der Wissenschaft, Raum Veolia, Pockelsstraße 11,
38106 Braunschweig

Wie wird das Zusammenleben und -wirken von Menschen, Tieren und Pflanzen einerseits und Maschinen andererseits zukünftig aussehen? Lassen sich Umfang und Intensität der neuen Synergien bestimmen?

Die Kommission Synergie und Intelligenz: technische, ethische und rechtliche Herausforderungen des Zusammenwirkens lebender und nicht lebender Entitäten im Zeitalter der Digitalisierung (SYnENZ) der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) befasst sich mit den sich durch diese Entwicklungen ergebenden Formen des Zusammenlebens. Eine sehr wichtige Rolle spielt dabei die Frage, womit wir es beim erweiterten Zusammenwirken mit künstlicher Intelligenz überhaupt zu tun haben. Ansätze, diese begrifflich-theoretisch zu beurteilen, im konkreten Fall messbar zu machen, und auch ethisch zu bewerten, stehen im Zentrum des 2. SYnENZ-Symposiums, welches sich entsprechend in drei Blöcke strukturiert:

Beurteilen: Neue Formen des Zusammenwirkens erfordern kritisches, d. h. „unterscheidendes“ Beurteilen. Wie kann solches Urteilen zu einer Ausdifferenzierung von Perspektiven, aber auch zur Erschließung gemeinsamer Konzepte und Kontexte beitragen, auf die sich die Forschung interdisziplinär beziehen kann?

Messen: Wie lässt sich erweitertes Zusammenwirken adäquat messen und untersuchen? Gibt es existierende empirische Ansätze, die hier genutzt werden könnten, z. B. randomisierte Studien, wie sie in der Medizin üblich sind? Diese Fragen werden insbesondere im Teil Messen des Symposiums aufgegriffen und diskutiert.

Bewerten: Der dritte Teil geht Herausforderungen für die ethische Bewertung nach. Welche Rolle spielen etwa das Berufsethos der beteiligten Professionen sowie die betroffenen Lebensformen und Praktiken? Müssen Normen und Wertvorstellungen angepasst werden?

Rund um diese Themen soll das Symposium viel Raum für Austausch und Diskussion bieten.

Programm

Mittwoch, 15.02.2023

10:30 Uhr Anmeldung, Kaffee und Tee

11:00 Uhr Begrüßung durch den Präsidenten der BWG und das Präsidium der TU Braunschweig

Beurteilen

11:15 Uhr

Einführung

Prof. Dr. Stefan Heuser

Institut für Ev. Theologie und Religionspädagogik der TU Braunschweig, Mitglied der SYnENZ-Kommission der BWG

11:30 Uhr

Synergie der Intelligenzen? – Was wir beurteilen sollten, bevor wir messen und bewerten

Dr. Bruno Gransche

Department Philosophie, Institut für Technikzukünfte ITZ des Karlsruhe Institut für Technologie und

Prof. Dr. Arne Manzeschke

Anthropologie und Ethik, Evangelische Hochschule Nürnberg

12:15 Uhr

Meaningful Human Control

Prof. Dr. Susanne Beck

Kriminalwissenschaftliches Institut der Leibniz Universität Hannover, Mitglied der BWG und der SYnENZ-Kommission

12:45 Uhr

Fragen & Diskussion

13:15 Uhr

Mittagsimbiss

Messen

14:15 Uhr

Einführung

Prof. Dr. Reinhold Haux

Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der
TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover,
Präsident der BWG und Mitglied der SYnENZ-Kommission

14:30 Uhr

Closing the Circle in a Learning Health System

Dr. Dominik Wolff

Nachwuchsgruppenleiter am Peter L. Reichertz Institut für Medi-
zinische Informatik der TU Braunschweig und der Medizinischen
Hochschule Hannover

und

Prof. Dr. Dr. Michael Marschollek

Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der
TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover,
Mitglied der BWG und der SYnENZ-Kommission

15:00 Uhr

**Mobilitätsverhalten und Verkehrssysteme: Gestaltung
klimafreundlicher Interaktion**

Prof. Dr. Meike Jipp

Institut für Verkehrsforschung des Deutschen Zentrums für Luft-
und Raumfahrt, Braunschweig, Mitglied der BWG und der SYn-
ENZ-Kommission

15:45 Uhr

Fragen & Diskussion

16:15 Uhr

Kaffeepause

Öffentliche Abendveranstaltung

18:00 Uhr im Altstadtrathaus Dornse

bis 20.00 Uhr **Vermenschlichung von Technik? Soziologische Blicke auf das
Zusammenspiel von Mensch und autonomer Technik**

Prof. Dr. Johannes Weyer

Seniorprofessor für Nachhaltige Mobilität an der TU Dortmund

Ist Künstliche Intelligenz zu kontrollieren?

Prof. Dr. Jochen Steil

Institut für Robotik und Prozessinformatik der TU Braunschweig,
Mitglied der BWG und Sprecher der SYnENZ-Kommission

Donnerstag, 16.02.2023**Bewerten**

- 9:00 Uhr **Einführung**
Prof. Dr. Tim Kacprowski
Peter L. Reichertz Institut für Medizinische Informatik der
TU Braunschweig und der Medizinischen Hochschule Hannover,
Mitglied der SYnENZ-Kommission
- 9:15 Uhr **Die Perspektive der evidenzbasierten Public Health**
PD Dr. Barbara Buchberger MPH
Robert Koch Institut, Berlin
- 9:45 Uhr **Mein Doktor, die KI und ich: Ethische Aspekte des Einsatzes Künstlicher Intelligenz in der Gesundheitsversorgung**
Prof. Dr. Dr. Sabine Salloch
Institut für Ethik, Geschichte und Philosophie der Medizin der
Medizinischen Hochschule Hannover, Mitglied der SYnENZ-
Kommission der BWG
- 10:15 Uhr Fragen & Diskussion
- 10:45 Uhr Kaffeepause
- Keynote**
- 11:30 Uhr **Intelligent Machines – Intelligent Humans Who Changes Whom?**
Prof. Dr. Klaus Bengler
Lehrstuhl für Ergonomie der TU München
- 12:15 Uhr Abschlussdiskussion zu den Leitfragen von Beurteilen, Messen und Bewerten
- 12:55 Uhr Verabschiedung & Schluss
- 13:00 Uhr Mittagsimbiss (falls gewünscht)

19. Bioethik-Symposium der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft „Umwelt und Gesundheit“

Veranstaltungstag: Mittwoch, 21. Juni 2023, 14.00 bis 18.00 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und
TU Braunschweig

Veranstaltungsort: Haus der Wissenschaft, Pockelsstraße 11,
38106 Braunschweig
Raum: Veolia/Weitblick, 5. OG

Unser diesjähriges 19. Bioethik-Symposium befasst sich mit einem kleinen Ausschnitt eines übergroßen nicht nur nationalen, sondern globalen Problems: mit der Frage, wie die von Menschen mitverursachten Umweltveränderungen die Gesundheit der Menschen, ja der Menschheit beeinträchtigen. Und wie können wir die gefährdete Gesundheit der Menschen schützen?

Der erste Vortrag wird einige der brennenden Konfliktfelder des Themas „Umwelt und Gesundheit“ skizzieren: sicher nur Mosaiksteinchen des globalen Bildes drohender und bereits folgenschwerer Veränderungen, Zerstörungen unserer nächsten und der weltweiten Umwelt. Es sind z. T. vom Menschen verursachte oder beschleunigte Prozesse mit ihren Auswirkungen auf die Zunahme von Herz- und Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, auf Stoffwechselstörungen (Diabetes, Hyperlipoproteinämie), auf allergische und infektiöse Erkrankungen und neurologische und psychische Erkrankungen, die allesamt zunehmen.

Im zweiten Vortrag geht es um die berechnete weltweite Angst vor Trink- und Nutzwasserverknappung. Dazu hat kürzlich die Internationale Wasserkonferenz im März in New York die mediale Diskussion erneut entfacht. Die starke Verschmutzung der kontinentalen Gewässer durch riesige Überschwemmungen, durch Industrieabwässer und die Grundwasserverseuchung mit Chemikalien oder Plastik in den Ozeanen bedroht den globalen Wasserhaushalt mit der Konsequenz gesundheitlicher Risiken durch Zunahme von Seuchen und Intoxikationen.

Der dritte Vortrag widmet sich der zunehmenden, im wörtlichen Sinne erstickenden Luftverschmutzung besonders in den zivilisatorischen Ballungsräumen – mit der Folge signifikanter Zunahme von Atemwegserkrankungen mit der Erderwärmung und der Klimabeeinflussung und deren Konsequenzen der destabilisierten Jahreszeiten.

Wie können wir dazu beitragen, diese fatalen Prozesse zu verlangsamen, wenn sie nicht aufzuhalten sind? Muss nicht der technologische Fortschritt inklusive der progressiven Industrialisierung begleitet werden von ebenso starken ökologischen Bemühungen um umweltschonende und -erhaltende Maßnahmen? Umweltschutz ist auch Gesundheitsschutz! Die weltweite Sorge um den Erhalt unserer Umwelt muss uns zu mitmenschlicher, ökonomischer und ökologischer Verantwortung veranlassen. Wir tragen eine zweiseitige Verantwortung: für die Umwelt und für den Menschen, die Erfordernis zweckorientierter und selbstverpflichtender Verantwortung. Das Symposium „Umwelt und Gesundheit“ wendet sich nicht nur an Experten, sondern vor allem an interessierte Laien.

Seien Sie wieder herzlich eingeladen zu diesem Symposium zu brennenden Fragen zum Thema „Umwelt und Gesundheit“.

Prof. Dr. Klaus Gahl, Mitglied der BWG

Prof. Dr. Christel Müller-Goymann, Mitglied der BWG

Prof. Dr. Reinhold Haux, Präsident der BWG

Programm

- 14:00 Uhr **Begrüßung**
 Prof. Dr. Reinhold Haux
 Präsident der Braunschweigischen
 Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG)
- 14:10 Uhr **Einführung**
 Prof. Dr. Christel Müller-Goymann
 Mitglied der BWG
- 14:15 Uhr **Umweltmedizin im 20. und 21. Jahrhundert**
 Dr. Tomke Zschachlitz
 Umweltbundesamt Berlin

- 15:15 Uhr **Wasser – ein knappes Gut**
Prof. em. Dr. Ali Müfit Bahadir
Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie der
Technischen Universität Braunschweig, Mitglied der BWG
- 16:15 Uhr Pause
- 16:30 Uhr **Fein, feiner, ultrafein – Partikuläre Luftbelastung in Städten**
Prof. Dr. Stephan Weber
Institut für Geoökologie der Technischen Universität
Braunschweig
- 17:30 Uhr **Schlusswort**
Prof. Dr. Klaus Gahl, Mitglied der BWG

Begrüßungsansprache auf dem 19. Bioethik-Symposium

REINHOLD HAUX

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Sehr geehrte Damen und Herren, die sie am 19. Bioethik-Symposium teilnehmen, sehr geehrte Vortragende – Herr Professor Bahadir, Herr Professor Weber, Frau Dr. Zaslitz –, lieber Professor Gahl und liebe Professorin Müller-Goymann, die Sie dieses Symposium zudem auch organisiert haben,

wieder einmal behandelt das Bioethik-Symposium der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft (BWG) mit dem Thema „Umwelt und Gesundheit“ eine aktuelle und wichtige Problematik: Wie beeinträchtigen die von Menschen mitverursachten Umweltveränderungen die Gesundheit der Menschen? Die Symposiums-Ankündigung geht noch weiter; dort steht „der Menschen, ja der Menschheit“. Und: „Wie können wir die gefährdete Gesundheit der Menschen schützen?[1]“

Auf diese Thematik und auf die Aspekte, über welche auf diesem Symposium vorgetragen wird, werden Sie, liebe Frau Müller-Goymann, gleich nach mir in Ihrer Einführung eingehen. Lassen Sie mich bitte in meiner Begrüßung etwas zur BWG sagen und warum Veranstaltungen wie dieses Bioethik-Symposium zu den zentralen Aufgaben der BWG gehören.

Zunächst: Was ist die BWG und welche Zielsetzung hat sie?

Auf der Eingangs-Webseite der BWG steht: „Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft (BWG) ist eine traditionsreiche Wissenschaftsgesellschaft mit ca. 200 Mitgliedern, die sich in ordentliche Mitglieder, korrespondierende Mitglieder und Mitglieder der Jungen BWG unterteilen. Als Vereinigung von Gelehrten hat sie zum Ziel, sich forschend, fördernd und vermittelnd mit den gesamtgesellschaftlichen Leistungen von Wissenschaft und Technik in einem steten interdisziplinären Diskurs auseinanderzusetzen. Nach Struktur und Zielsetzung ist sie den Akademien der Wissenschaften analog und verfügt über das Selbstergänzungsrecht. Die BWG ist eine Körperschaft des öffentlichen Rechts des Landes Niedersachsen. Ihre ordentlichen Mitglieder haben ihre wissenschaftliche Heimat vorrangig in den technisch ausgerichteten Universitäten des Dreiecks Braunschweig – Clausthal – Hannover.“ ([2])

Vielleicht klingt dies etwas abstrakt. In anderen Worten und zur Erläuterung kann ich ergänzen: Zu den zentralen Aufgaben der BWG gehören die Pflege des fächerübergreifenden Dialogs und die Wissensvermittlung. Und dies zu Themen von hoher gesellschaftlicher Bedeutung. Mit Veranstaltungen wie etwa mit diesem Bioethik-Symposium unterstützt die BWG die öffentliche Teilhabe an Forschung und Entwicklung. Diese so wichtigen öffentlichen Veranstaltungen mit Vorträgen über aktuelle Forschung durch fachlich hervorragend ausgewiesene Personen sind ein Beitrag, der vielleicht besonders gut über Gelehrtenvereinigungen wie der BWG geleistet werden kann. Um nochmals auf die Eingangs-Webseite der BWG zurückzukommen: „Als Vereinigung von Gelehrten hat sie zum Ziel, sich forschend, fördernd und vermittelnd mit den gesamtgesellschaftlichen Leistungen von Wissenschaft und Technik in einem steten interdisziplinären Diskurs auseinanderzusetzen.“.

Und nun zu den Bioethik-Symposien.

Diese veranstaltet die BWG seit dem Jahr 2004 zu „gleichermaßen wissenschaftlich wie gesellschaftlich relevanten Problemfeldern“ ([3]). Die Bioethik-Symposien finden jährlich statt. Ihre Vorträge bilden in der Regel einen „Vierklang“ ([3]), aus thematischer Einführung, fachlichen Grundlagen sowie rechtlichen und ethischen Aspekten.

Die Themen stammen aus der Biomedizin als Gegenstandsbereich. Themen von Bioethik-Symposien waren unter anderem:

- Von der Stammzellforschung zur Stammzelltherapie (2004),
- Genetische Daten als Ware – Möglichkeiten und Risiken im Umgang mit Biobanken (2008),
- Selbstbestimmtes Leben im Alter – Informatik als Segen oder Bedrohung? (2012),
- Nahrungsmittelproduktion und Tierwohl (2017),
- Möglichkeiten und Grenzen der Gen-Therapie mit der „Gen-Schere“ (2020) und
- mRNA-Therapie (2022).

Und wie so viele gesellschaftlich relevante Themen benötigen diese nicht nur Fachwissen aus den jeweiligen Gegenstandsbereichen. Sie müssen natürlich auch in einem größeren Zusammenhang betrachtet und behandelt werden. Dazu gehören dann auch, unter anderem, ethische Aspekte. So kam es bei diesen Symposien zu der Bezeichnung „Bioethik“.

Zu Beginn, bis 2012, wurden die Symposien gemeinsam mit der Akademie für Ethik in der Medizin durchgeführt. Mit zu den Organisatoren gehörte bei den ersten neun Symposien bis zum Jahr 2013 der damalige BWG-Präsident Professor Joachim Klein. Seit 2014, seit dem 10. Bioethik-Symposium, sind Sie, liebe Frau Müller-Goymann, an der Organisation beteiligt. Initiator und von Anfang an treibende Kraft der Bioethik-Symposien waren und sind Sie, lieber Herr Gahl.

Allen, die an der Vorbereitung und Durchführung des diesjährigen Bioethik-Symposiums beteiligt waren und sind, danke ich herzlich für deren Engagement! Nun möchte ich an Sie, Frau Müller-Goymann, übergeben. Uns allen wünsche informative, spannende Vorträge und intensive Diskussionen!

Literatur

- [1] Flyer des 19. Bioethik-Symposiums. <http://bwg-nds.de/veranstaltungen/2023-bioethik-symposium/>. Zuletzt zugegriffen am 20.03.2023.
- [2] Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft. <http://bwg-nds.de>. Zuletzt zugegriffen am 20.03.2023.
- [3] Gahl K. Symposien zur Bioethik. In: Weßelhöft D., Matuschek O. 70 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft 1943–2013, S. 70. Braunschweig: Appelhaus; 2013. https://leopard.tu-braunschweig.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbbs_derivate_00036405/70_Jahre_BWG.pdf. Zuletzt zugegriffen am 20.03.2023.

Einführung

CHRISTEL MÜLLER-GOYMANN

Lassen Sie mich mit einem Statement beginnen: Eine wichtige Grundlage für die Gesundheit des Menschen ist eine gesunde Umwelt.

Es ist keine Frage, was wir bevorzugen:

Saubere Luft oder Abgaswolken?

Vogelgezwitscher oder Straßenlärm?

Sauberes frisches Quellwasser oder kontaminierte Abwässer aus Industrie und Landwirtschaft?

Der Zustand der Umwelt wirkt sich auf unser Wohlbefinden aus – im positiven wie im negativen Sinn.

Ich möchte zur Einstimmung in die folgenden Vorträge einige Beispiele nennen.

Erstens

Seit der Corona-Pandemie ist uns allen viel deutlicher bewusst, dass Viren in der Atemluft zu schweren Infektionen führen und sogar den Tod bedeuten können. Darüber hinaus können uns aber auch zu hohe Schadstoffgehalte der Luft krank machen und gleichzeitig der Umwelt schaden. Luftschadstoffe sind vor allem Feinstaub und die chemischen Substanzen in Gasform wie Ozon – gerade aktuell beim heißen Wetter der letzten Tage deutlich oberhalb eines kritischen Grenzwerts – sowie Stickstoffoxide, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid, die wie der Feinstaub vor allem im Strassenverkehr, in der Industrie und beim Heizen entstehen. Die Luftschadstoffe reizen die Schleimhäute, führen zu Entzündungen und Erkrankungen der Atemwege und reduzieren die Lungenfunktion. Außerdem können sie sich negativ auf das Herz-Kreislauf-System auswirken und bestehende Erkrankungen verschlimmern, so dass beispielsweise Asthmakranke ihre Medikamentendosierung anpassen müssen. Umgekehrt lindern Aufenthalte am Meer und in den Bergen in der schadstoffarmen Luft sogenannter „Luftkurorte“ die Beschwerden.

Zweitens

Auch Lärm kann uns krank machen und wird als Umweltbelastung am häufigsten wahrgenommen. Mehr als zwei Drittel der Bevölkerung fühlen sich dadurch belästigt. Lärm verursacht Stressreaktionen, indem der Körper verstärkt Stresshormone ausschüttet. Infolge steigt der Blutdruck und die Herzfrequenz nimmt ebenfalls zu. Nächtlicher Lärm beeinträchtigt außerdem das Einschlafen und die Tief- und Traumschlafphasen negativ. Eine dauerhafte Lärmbelastung von mehr als 55 Dezibel in der Nacht und mehr als 65 Dezibel tagsüber erhöht nachweislich das Risiko für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Wie kann man gegensteuern?

Und drittens

Die Wasserqualität wird unter anderem vom Nitrateintrag aus der Landwirtschaft über Dünger und tierische Exkremente bestimmt. Nitrat im Trinkwasser wird nach Aufnahme in den Organismus durch Mikroorganismen des Darms zu Nitrit reduziert, welches an der Bildung kanzerogener Nitrosamine beteiligt ist. Darüber hinaus wird bei Säuglingen durch Nitrit die Sauerstoffversorgung über das Blut gehemmt, weshalb Trinkwasser zur Zubereitung von Babynahrung besonders nitratarm zu sein hat. Wasserwerke in Deutschland sorgen durch Mischen mit weniger belastetem Wasser oder durch Trinkwasseraufbereitung dafür, dass keine überhöhten Nitratgehalte im Trinkwasser zu befürchten sind. Die Trinkwasseraufbereitung ist natürlich aufwendig, erhöht den Trinkwasserpreis und gebietet den Schutz des Grundwassers vor Kontamination.

Die folgenden drei Vorträge werden uns wichtige Aspekte zum Thema des 19. Bioethik-Symposiums nahebringen. Im ersten Vortrag wird Frau Dr. Tomke Zschachlitz vom Umweltbundesamt Berlin einen Überblick über die „Umweltmedizin im 20. und 21. Jahrhundert“ geben. Danach wird Herr Prof. Ali Müfit Bahadir, Emeritus des TU Instituts für Ökologische und Nachhaltige Chemie, zum Thema „Wasser – ein knappes Gut“ referieren. Nach der Pause schließt sich dann der Vortrag „Fein, feiner, ultrafein – Partikuläre Luftbelastung in Städten“ von Herrn Prof. Stephan Weber, Institut für Geoökologie, Klimatologie und Umweltmeteorologie der TU Braunschweig an.

Wasser – ein knappes Gut weltweit

MÜFIT BAHADIR

Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie, TU Braunschweig,
38106 Braunschweig; E-Mail: m.bahadir@tu-braunschweig.de

1 Wasser auf der Erde

Blickt man vom Weltall auf den Planeten „Erde“, sieht man fast nur Wasser, egal wie man ihn dreht und wendet. Denn 70 % der Erdoberfläche ist von Weltmeeren bedeckt. Diese sind zum Teil tiefer als die höchsten Berge auf den Kontinenten hoch sind (Mariannengraben: -10.994 m vs. Mount Everest: $+8.848$ m). Die Kontinente sind quasi Inseln in den Ozeanen, mal etwas größer und zusammenhängend, mal etwas kleiner und verstreut, aus der Ferne kaum zu erkennen. Ist es dann richtig, vom „Wasser als ein knappes Gut weltweit“ zu sprechen?

In ihrem UN-Weltwasserbericht 2024 schreibt die deutsche UNESCO-Kommission: *„Die gerechte Verteilung von Wasser ist die Grundlage für Wohlstand und Frieden. Umgekehrt können Armut und Ungleichheit, soziale Spannungen und Konflikte durch eine unsichere Wasserversorgung verschärft werden. ...Klimawandel, Kriege, Konflikte und andere Krisen verschärfen den ohnehin ungleichen Zugang zu Wasser. ...Fast immer sind es die Ärmsten und Schwächsten, die davon am stärksten betroffen sind.“* [1] Wenn also vom „Wasser als ein knappes Gut weltweit“ gesprochen wird, so sind tatsächlich nur die Süßwasser-Reserven gemeint, die als Trinkwasser und zur täglichen Hygiene sowie zur Bewässerung in der Landwirtschaft für die Nahrungsproduktion gebraucht werden.

Das gesamte Volumen von Wasser auf der Erde beträgt $1.384.120.000$ km³, also fast 1,4 Milliarden km³, wobei 1 km³ H₂O mit der Dichte $\rho = 1$ g/cm³ einer Masse von 10^9 Tonnen entspricht (1 Milliarde Tonnen). Hiervon sind $1.348.000.000$ km³ ($\sim 97,4\%$) als Salzwasser in den Weltmeeren akkumuliert und können für die menschliche Nutzung nur nach einer aufwendigen Aufbereitung wie energieintensiver Entsalzung verwendet werden. Die verbleibenden 2,6 % sind Süßwasser ($36.000.000$ km³), die sich mit dem Hauptanteil von 2,0 % in Form von Polareis, Meeres-Eis und Binnengletschern ($27.820.000$ km³), 0,58 % als Grundwasser und Bodenfeuchte ($8.062.000$ km³), 0,02 % als Oberflächenwasser in Seen und Flüssen (225.000 km³) und 0,001 % als Wolken und Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre (13.000 km³) befinden. Aus ökologisch unmittelbar ersichtlichen Gründen ist die Nutzung des gefrorenen Wassers in Polar- und Meeres-Eis sowie den Binnengletschern für die menschliche Konsumption ein absolutes Tabu. Hierfür verbleiben also lediglich die Grund- und Oberflächenwässer mit 0,6 % des Gesamtwasservorrats auf der Erde übrig.

Wasser auf der Erde befindet sich in einem ständigen globalen Kreislauf, wobei das Gesamtvolumen wegen der Erdanziehung konstant bleibt. Wasser entweicht also nicht in das Weltall. Wie aus Abb. 1 deutlich wird, wird der Kreislauf des Wassers durch den Energieeintrag der Sonne getriggert; es verdunstet hauptsächlich von der Oberfläche der Weltmeere (70% der Erdoberfläche), aber auch von Seen und Flüssen, Böden und Pflanzenoberflächen in die Atmosphäre. Dieser gesamte Vorgang wird Evapotranspiration bezeichnet. Der Wasserdampf in der Atmosphäre wird durch Wind und Wetter transportiert und regnet sich an anderen Orten wieder ab.

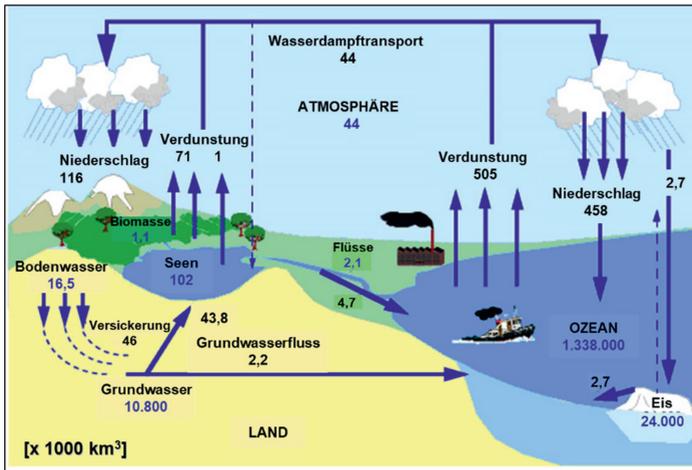


Abb. 1. Der globale Wasserkreislauf (Quelle: Klimawandel-Wiki). [2]

Je wärmer das Klima wird, umso mehr Wasser kann verdunsten. Gleichzeitig nimmt die wärmere Luft mehr Wasser auf, bevor sie sich sättigt und dabei den Treibhauseffekt in der Troposphäre verstärkt – *circulus vitiosus*. Die größere Wassermenge in der Luft führt zu stärkeren Niederschlägen, die auf zum Teil ausgetrockneten Böden nicht gleich versickern können und somit zu Überschwemmungen und Flutkatastrophen führen. Das Austrocknen der Böden führt in bestimmten Regionen der Erde andererseits zu einem starken Wasserstress (Abb. 2). Diese befinden sich in einem Gürtel nördlich des Äquators, von den südlichen USA über Nordafrika, der arabischen Halbinsel, Iran, Indien und alle „stan“-Länder bis hin zu China. [3]

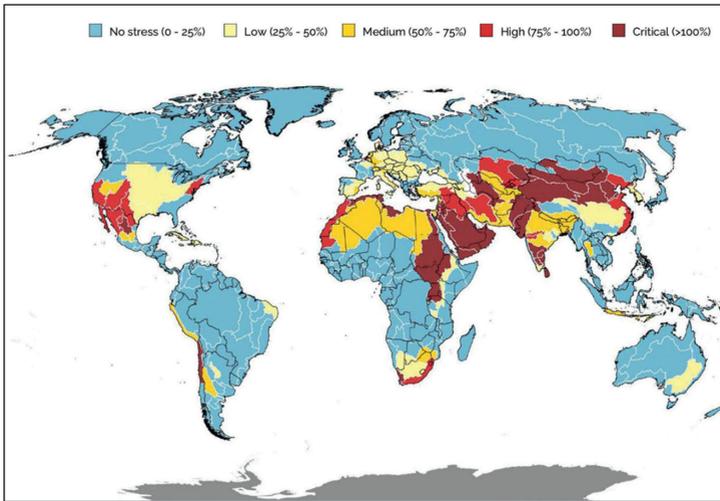


Abb. 2. Level of Water Stress of all Sectors by Major Basins; (Quelle: FAO, 2021). [3]

2 Trinkwasser – Gewinnung und Nutzung

Entsprechend den klimatischen Bedingungen und Niederschlagsmengen ist die Gewinnung und Nutzung von Süßwasser als Trink- und Brauchwasser abhängig vom so genannten „Wasserdargebot“, das auch als „*blaues Wasser*“ bezeichnet wird. Blaues Wasser wird aus Seen, Flüssen und dem Grundwasser für unterschiedliche Nutzungszwecke und zur Bewässerung in der Landwirtschaft entnommen. „*Grünes Wasser*“ ist dagegen Niederschlagswasser als Regen und Schnee, das im Boden gespeichert wird und für das Pflanzenwachstum zur Verfügung steht. Der Vollständigkeit halber sei auch das „*graue Wasser*“ definiert als Wasser, das durch menschliche Aktivitäten (aus industriellen, landwirtschaftlichen oder kommunalen Quellen) verunreinigt wurde. Die Verfügbarkeit und Nutzung von „*blauem Wasser*“ in Deutschland wird in Abb. 3 dargestellt. [4] Danach betrug im Jahre 2019 die Gesamtmenge des verfügbaren Süßwassers in Deutschland 176 km^3 , wovon 20 km^3 (11,4%) für die vier statistisch erfassten Sektoren, öffentliche Wasserversorgung (3,1%), Bergbau und Industrie (3,1%), Energieversorgung (5,0%) und die landwirtschaftliche Bewässerung (0,2%), genutzt wurden. Die geringe Nutzung von blauem Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung in Deutschland ist eine bemerkenswerte Ausnahme auf der Welt, werden doch im weltweiten Durchschnitt ca. 70% des verfügbaren Süßwassers in der Landwirtschaft verwendet. [5] Das ist der Tatsache geschuldet, dass in Deutschland, von regionalen Ausnahmen abgesehen, in der Regel hinreichend grünes Wasser zur Verfügung steht. Durch Wassersparmaßnahmen, insbesondere in der Energiewirtschaft, wurde der Süßwasserverbrauch in Deutschland in den letzten 30 Jahren von $46,3 \text{ km}^3$ auf $20,0 \text{ km}^3$ mehr als halbiert (Abb. 4).

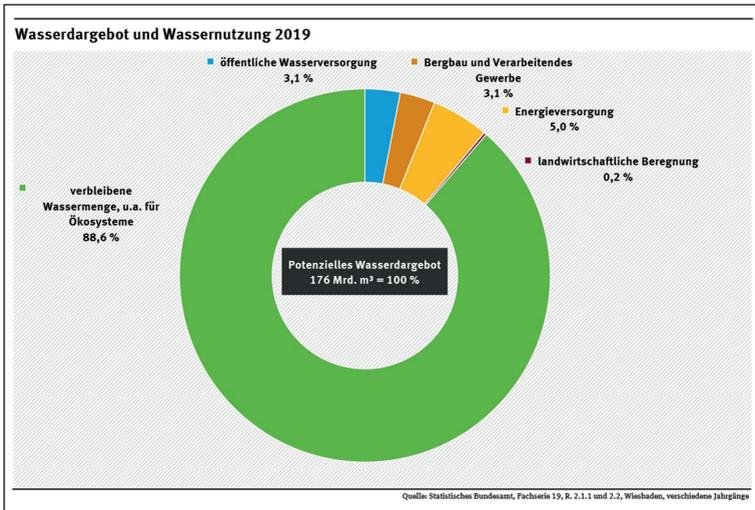


Abb. 3. Wasserdargebot und Wassernutzung in Deutschland, 2019 (Quelle: UBA 2019). [4]

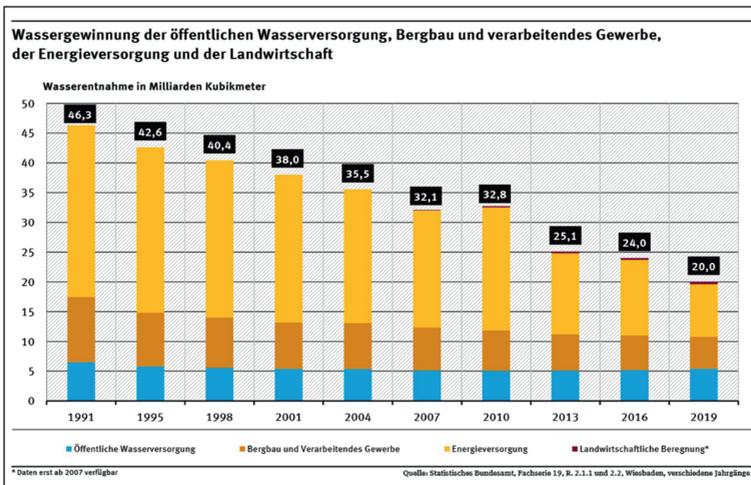


Abb. 4. Entwicklung des Wasserbrauchs in Deutschland 1991-2019 (Quelle: UBA 2019). [4]

Die Ungleichverteilung der Süßwasserreserven auf der Erde stellt ein erhebliches Problem dar. So leben z. B. in den MENA-Staaten (Middle East and North African Countries) ca. 6 % der Weltbevölkerung, die jedoch nur über 1 % der weltweiten Süßwasserressourcen verfügen. [6] So betrug das verfügbare und genutzte Süßwasser in Jordanien in 2005 weniger als eine Milliarde Kubikmeter, wovon der Löwenanteil von 64 % in der Landwirtschaft verbraucht wurde, während für die

kommunale Nutzung 31 %, die Industrie 4 % und Sonstige 1 % übrigblieben. Dass dies in der Region zu erheblichen zwischenstaatlichen Konflikten führen muss, erscheint evident, wie am Beispiel des Flusses Jordan dokumentiert ist. Durch die intensive Nutzung des Jordanwassers insbesondere in israelischen Farmen, die 90 % des Jordanwassers verbrauchen [7], bleibt nur ein kümmerlicher Rest übrig, der in das Tote Meer fließt und die Verdunstung des Letzteren nicht mehr kompensieren kann. Hierdurch sinkt der Wasserspiegel im Toten Meer jährlich um ca. einen Meter und liegt heute bei -427 m unter dem Meeresspiegel. [8] Eine partielle Lösung der Wasserknappheit in der Region bei gleichzeitiger Wiederauffüllung des Toten Meeres könnte die Meerwasserentsalzung aus dem Roten Meer durch Jordanien bringen (Red Sea – Dead Sea Channel), die durch das bestehende Gefälle von über 400 m Höhenunterschied Wasserturbinen antreiben, dabei Strom erzeugen, mit dem die Entsalzungsanlagen (Membranfiltration und Umkehrosmose) betrieben werden könnten. Das gewonnene Süßwasser könnte als Trinkwasser genutzt und die entstehende Salzlake in das Tote Meer eingeleitet werden. Gegen dieses Projekt gibt es allerdings auch technische, wirtschaftliche und z. T. ökologische Bedenken. [9] Die gegenwärtige politische Krise (März 2024) zwischen Israel und Palästina erscheint für ein solches Kooperationsprojekt in der Region auch nicht gerade förderlich.

3 Wasser und Klimawandel

Wasser ist ein Menschenrecht. Sauberes Wasser und eine angemessene Sanitärversorgung sind Menschenrechte und lebensnotwendig. Das ist auch im SDG 6 der 17 *Sustainable Development Goals* bis 2030 der Vereinten Nationen (SDGs) verankert. Weltweit haben heute über 700 Millionen Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser, über 2,2 Milliarden Menschen fehlt der Zugang zu einer sicheren Wasserversorgung. Das heißt: Sie haben keinen Zugang zu Wasser auf dem Wohngrundstück, der frei von Kontamination und bei Bedarf jederzeit verfügbar ist. 3,5 Milliarden Menschen haben keine sichere Sanitärversorgung und Abwasserbehandlung. Dabei ist Hygiene, vor allem der Hände, unerlässlich für die Vermeidung von Infektionskrankheiten und die Pandemieprävention. [10]

Durch den Klimawandel und die globale Erwärmung sind die früher für Länder des Globalen Südens zutreffenden Zustände des Wasserstresses durch Trockenheit und Überschwemmungen inzwischen zunehmend auch in Mitteleuropa spürbar. Gerade das niederschlagsarme trockene Frühjahr 2023 führte in europäischen Staaten einschließlich Deutschlands zu erheblichen Schäden in den Wäldern und der Vegetation, zum Austrocknen von Böden und Gewässern. Allerdings nur einen Monat später, im Mai 2023, führten sintflutartige Niederschläge wiederum zu katastrophalen Überschwemmungen mit Milliarden Euro Vermögensschäden. Die ausgetrockneten Böden konnten die großen Wassermassen nicht oder nicht

schnell genug aufnehmen, was zu Überflutungen von Flüssen und ganzen Landschaften führte (Norditalien, die Elbe, das Ahrtal etc.). „Infolge des Klimawandels nehmen bereits heute die Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse zu. Dazu zählen Hitzewellen, Dürren, Wirbelstürme, Überschwemmungen und Flächenbrände. ...Darüber hinaus verursacht der Klimawandel schleichende Umweltveränderungen: Gletscher schmelzen, der Meeresspiegel steigt an, Ozeane versauern, Böden versalzen, Grundwasserspiegel sinken, Wüstengebiete breiten sich aus und die Artenvielfalt schwindet. Dies stellt die Menschen weltweit vor große Herausforderungen und bedroht Lebensgrundlagen.“ [11]

4 Gewässergüte und Wasserqualität

Die Gewässergüte und Wasserqualität sind im Wesentlichen abhängig von eingetragenen Schadstoffen, die durch ihre Toxizität auf die darin lebenden Organismen bzw. durch die Sauerstoffzehrung bei deren Abbau mit Hilfe von Bakterien auf indirektem Wege zur Schädigung beitragen können. In Tab. 1 wird die Güteeinstufung eines Oberflächengewässers in sieben Güteklassen von I bis IV mit Zwischenwerten dargestellt.

Güteklasse	O ₂ -Gehalt		O ₂ -Zehrung		BSB ₅
	[mg/L] 20 °C, 1 bar	[%] Sättigung	[mg/L] 20 °C	[%]	[mg/L] 20 °C
I	8,45 - 8,84	95 - 100	0,0 - 0,3	0 - 5	0,0 - 0,5
I-II	7,50 - 8,45	85 - 95	0,3 - 1,1	5 - 10	0,5 - 2,0
II	6,20 - 7,50	70 - 85	1,1 - 2,2	10 - 20	2,0 - 4,0
II-III	4,40 - 6,20	50 - 70	2,2 - 3,8	20 - 40	4,0 - 7,0
III	2,20 - 4,40	25 - 50	3,8 - 7,0	40 - 70	7,0 - 13
III-IV	0,90 - 2,20	10 - 25	7,0 - 12,0	70 - 95	13 - 22
IV	0 - 0,90	0 - 10	> 12	> 95	> 22

Tab. 1. Güteeinstufung eines Gewässers (BSB₅ = Biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen).

Je höher der Gehalt an organischen, biologisch abbaubaren Stoffen in einem Gewässer ist, desto mehr Sauerstoff verbrauchen die Mikroorganismen bei deren Verstoffwechslung und Abbau, wodurch Sauerstoffgehalt und Sauerstoffsättigung sinken. Dies führt zu zunehmend anaeroben Verhältnissen im Wasser, Schwefelwasserstoff und Ammoniak bilden sich als anaerobe Abbauprodukte, und das Gewässer eutrophiert („kippt um“), Fische sterben. Das Gleiche passiert auch bei einer Überdüngung der Gewässer mit Nährstoffen im Abwasser und aus der Landwirtschaft, wie Nitrat und Phosphat, die zunächst zu einem starken Al-

genwachstum führt. Dadurch wird die Transparenz des Wassers und der Lichteintrag eingeschränkt. In der Folge stirbt ein Teil der Algen in tieferen Schichten ab, die wiederum von Bakterien als Futter verzehrt werden und dabei Sauerstoff verbrauchen. Also führt auch das zur Eutrophierung der Gewässer. Diese Prozesse hatten einen dramatischen Einfluss auf die Qualität großer deutscher Flüsse im vergangenen Jahrhundert. Wie am Beispiel des Rheins gezeigt wird, ging die Gewässerqualität durch Industrialisierung und Zuzug zu großen Städten entlang des Rheins zunächst zurück, was sich im Rückgang der Sauerstoffsättigung, der Artenvielfalt und der Abundanz des Makrozoobenthos (Wirbellose Organismen im Sediment) ausdrückte. Die Bestände erholten sich erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts, im Wesentlichen durch den Bau von Abwasserkläranlagen in der Industrie und den Kommunen ab Ende der 1970er-Jahre (Abb. 5). [12] Eine ähnliche Entwicklung konnte man auch in der Elbe beobachten, wobei der starke Anstieg der Biodiversität und Abundanz ab Beginn der 1990er-Jahre einsetzte, als infolge der deutschen Wiedervereinigung eine starke Bautätigkeit in Sachen Kläranlagen aufgenommen wurde.

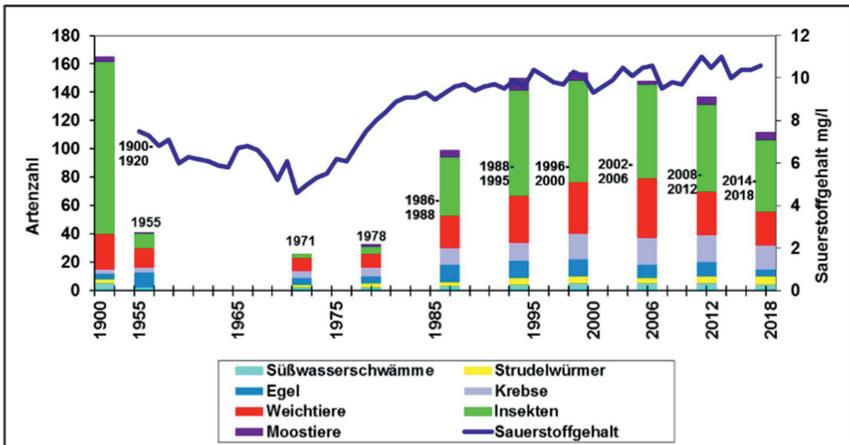


Abb. 5. Entwicklung der Lebensgemeinschaften und des Sauerstoffgehalts des Rheins zwischen Basel und der niederländischen Grenze (Quelle: IKS, 2002). [12]

Die Gewässerqualität der Fließgewässer in Deutschland wird in Abb. 6 wiedergegeben. Etwas über 7% der Flusskilometer am deutschen Gewässernetz von ca. 30.000 km sind unbelastet bis gering belastet und gelten als Laich- bzw. Edelfischgewässer (Güteklassen I bzw. I-II). Das Gros der Fließgewässer gehört den Klassen II bzw. II-III an und ist damit mäßig belastet (57,8%) bzw. kritisch belastet (31,4%), das sind jedoch immer noch ertragreiche Fischgewässer. Die Güteklassen III, III-IV und IV sind stark bis übermäßig verschmutzt, mit geringen Fischerträgen, periodischem Fischsterben bzw. deren vollständigem Fehlen. Diese machen insgesamt 3,5% aus. [13]

Güteklasse	Grad der Belastung		1995	2000
I	unbelastet	Laichgewässer für Edelfische	0,7 %	0,8 %
I-II	gering belastet	Edelfischgewässer	3,8 %	6,5 %
II	mäßig belastet	ertragreiche Fischgewässer	42,7 %	57,8 %
II-III	kritisch belastet	noch ertragreiche Fischgewässer	43,6 %	31,4 %
III	stark verschmutzt	geringe Fischereierträge, periodisches Fischsterben	7,4 %	2,8 %
III-IV	sehr stark verschmutzt	Fische nur zeitweilig und örtlich begrenzt	1,1 %	0,3 %
IV	übermäßig verschmutzt	Fische fehlen	0,7 %	0,4 %

Abb. 6. Gewässergütequalität in Deutschland, Anteile der Flusskilometer am deutschen Gewässernetz (30.000 km) (nach: UBA/LAWA, Gewässergüteatlas, 2000). [13]

5 Schadstoffe im Wasser

Wassergefährdende Stoffe beeinflussen die Gewässergüte unmittelbar. Sie sind feste oder flüssige Stoffe, die die physikalischen, chemischen oder biologischen Eigenschaften des Wassers nachteilig verändern. Die Einstufung in Wassergefährdungsklassen (WGK) erfolgt nach dem Wasserhaushaltsgesetz über die Verwaltungsvorschrift wassergefährdender Stoffe (VwVwS) vom 17. Mai 1999. [14] Die Novelle der VwVwS vom 27. Juli 2005 trat am 1. August 2005 in Kraft. Darin wurden drei Wassergefährdungsklassen definiert (mit einigen Stoffbeispielen):

WGK 3: stark wassergefährdend
LCKW, BTX-Aromaten, Mercaptane, Pestizide, Schwermetalle

WGK 2: wassergefährdend
Phenol, Formalin, Alkanole, Acetonitril, Heizöl EL, Kaliumpermanganat

WGK 1: schwach wassergefährdend
Aceton, Acetaldehyd, Ethanol, n-Butanol, organische Acetate, Dimethylformamid, Glucose, Sodalösung

Eine WGK 0 wurde nicht definiert, jedoch eine Reihe von Substanzen als nicht wassergefährdend aufgelistet, u. a. Acetylen, Aluminiumoxid, Argon, Bariumcarbonat, Bitumen, Calciumcarbonat etc. Diese Stoffe reagieren offensichtlich nicht mit Wasser oder den darin lebenden Organismen, so dass sie die Wasserqualität nicht nachteilig verändern.

Eine besondere Aufmerksamkeit erregen Pestizide (PSM = Pflanzenschutzmittel) in Oberflächen- und Grundwässern, da insbesondere bei Letzteren die Gefahr besteht, dass diese Schadstoffe in das Trinkwasser gelangen können. Es wurden daher bereits in den 1990er-Jahren und später Trinkwasserbrunnen beprobt und PSM darin untersucht (Abb. 7). [15] Der nach wie vor gültige Grenzwert für PSM beträgt $0,1 \mu\text{g/L}$. In den meisten Wasserproben konnten keinerlei PSM nachgewiesen werden (1990: 71,7% bis 2008: 82,6%), bzw. die nachgewiesenen Konzentrationen lagen unterhalb des Grenzwertes (1990: 18,6% bis 2008: 12,8%). Allerdings wurden 1990 auch in 8,6% der Proben eine Grenzwertüberschreitung und in 1,1% eine 10fache Überschreitung festgestellt, die in 2008 mit 3,8% und 0,8% stark zurückgegangen sind.

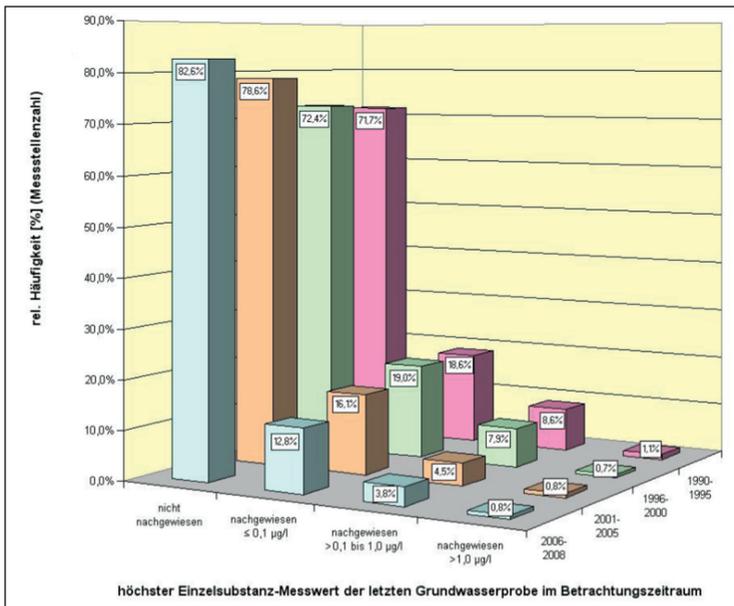


Abb. 7. Pestizide im Grundwasser in Deutschland 1990 bis 2008. (Quelle: LAWA, 2010). [15]

Bereits bei der ersten Trinkwasserverordnung (TrinkwV) von 1989 galt in Deutschland für Pestizide und ähnliche biologisch aktive Substanzen das Nullprinzip der EG-Verordnung, d. h. es sollten keine PSM darin enthalten sein. Bei einer „Guten Landwirtschaftlichen Praxis“ sollten keine PSM ins Grundwasser und bei deren Aufbereitung in das Trinkwasser gelangen. „Null“ ist jedoch analytisch nicht definiert und kontrollierbar bzw. statistisch auswertbar. Daher wurden als „Null“ die damaligen analytischen Nachweisgrenzen für PSM angenommen und damit ein Grenzwert von $0,1 \mu\text{g/L}$ festgelegt, der nicht toxikologisch, sondern lediglich ana-

lytisch begründet ist. Diese Nachweisgrenzen wurden mit der Fortentwicklung der Spurenanalytik bereits seit langem um mehrere Größenordnungen herabgesetzt, so dass sie heute nur noch historischen Wert besitzen.

Die chemischen Strukturen einiger im Grundwasser häufig nachgewiesenen PSM-Wirkstoffe sind in Abb. 8 aufgeführt. Diese sind (von einigen Ausnahmen abgesehen) vorwiegend Herbizide, die für ihren Wirkungspfad eine größere Wasserlöslichkeit benötigen, um von den Pflanzen aufgenommen und mit dem Saftstrom zu den Wirkorten transportiert zu werden.

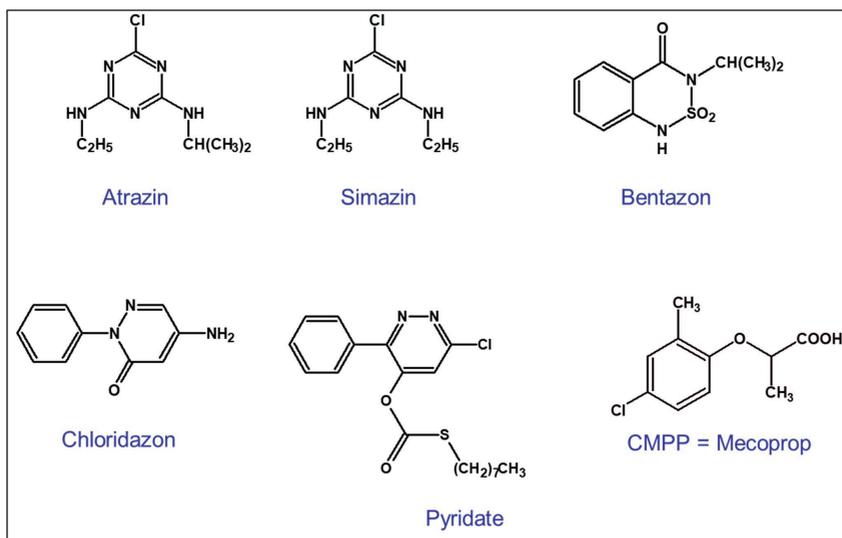


Abb. 8. Einige im Grundwasser häufig nachgewiesene PSM-Wirkstoffe.

Neben den PSM-Wirkstoffen spielen auch die Human- und Veterinärarzneimittel sowie Körperpflegemittel (PPCP = Pharmaceuticals and Personal Care Products) in Oberflächen- und Grundwässern eine wichtige Rolle. Während die PSM-Applikation auf landwirtschaftlichen Flächen durch zahlreiche Maßnahmen zur Vermeidung von Oberflächenabfluss (*surface runoff*) an Ackerrandstreifen und Spray Abdrift beim PSM-Spritzen in weiten Grenzen kontrolliert werden kann, sind die Eintrittspfade für Veterinär- und Humanpharmaka und PPCP in die Umwelt durch Abwässer, Hausmüll, Gülle und Dung bestimmt. Häusliche Abwässer enthalten Urin und Fäkalien aus den Toiletten, in die Humanpharmaka nach Einnahme durch Patienten in ursprünglicher Form oder nach Metabolisierung im Körper ausgeschieden werden. Über die kommunale Abwassersammlung und -klärung gelangen diese über Kläranlagenabläufe in die Vorfluter, d. h. in Fließgewässer. Der Klärschlamm, der einen Teil der adsorbierten Arzneimittelrückstände enthält,

wird vielfach auf Deponien abgelagert und trägt dort gemeinsam mit den über feste Abfälle entsorgten Restarzneimitteln durch Versickerung oder Oberflächenablauf der Deponiesickerwässer zur Belastung der Grund- und Oberflächenwässer bei. Die Veterinärpharmaka in Ausscheidungen der Stalltiere erzeugen Gülle und Dung, die als Dünger auf Ackerböden aufgebracht werden und von dort ihren Weg über das Grundwasser in das Trinkwasser finden können. Diese komplexen Eintragspfade von PPCP sind in der Abb. 9 dargestellt. [16].

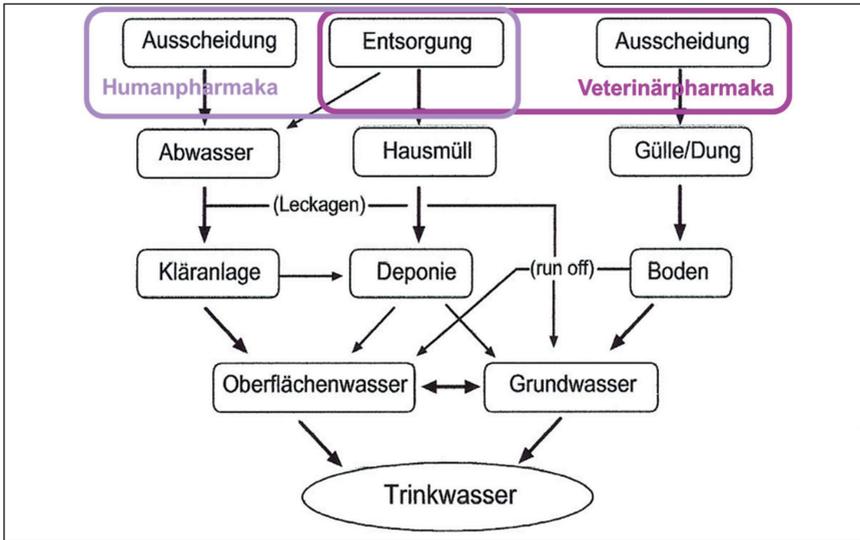


Abb. 9. Eintragspfade von Arzneimitteln in die Umwelt (nach: Ternes, 1998). [16]

Herkömmliche kommunale Kläranlagen mit biologischer Reinigung, die in Deutschland und Europa die Regel darstellen, sind nicht in der Lage, PPCP-Rückstände vollständig zu entfernen. Die Arzneimittelrückstände werden bis zu einem gewissen Grad metabolisiert, wobei die Metaboliten häufig leichter wasserlöslich sind. Sie werden gemeinsam mit restlichen Rückständen mit dem Ablaufwasser in die Umwelt abgegeben (Vorfluter). In seltenen Fällen, wie z. B. in Braunschweig und Wolfsburg, wird der Kläranlagenablauf zur Bewässerung von landwirtschaftlichen Flächen verwendet, wobei diese Ablaufwässer einer weiteren „Reinigung“ durch Bodenadsorption unterliegen. Um die landwirtschaftlichen Flächen und die Feldfrüchte nicht zu kontaminieren, müssen diese Böden intensiv und engmaschig analytisch kontrolliert werden, was durch Probenahmen in Feldlysimetern erfolgt.

Der Grad der Elimination von Arzneimittelrückständen bei der Abwasserklärung wurde an verschiedenen Kläranlagen untersucht. Ein solches Ergebnis aus dem Jahr 2006 wird in Abb. 10 dargestellt. [17] Hohe Konzentrationen an Antibiotika, Analgetika, Antiepileptika, Betablockern, Kontrastmitteln und Moschus-Duftstoffen wurden nachgewiesen. Einige dieser Wirkstoffe werden in der Kläranlage sehr gut eliminiert (z. B. Ibuprofen zu 96%), wieder andere gar nicht oder nur zu einem geringen Teil (z. B. Carbamazepin und Diatrizoate zu 0%, Iopamidol zu 17%, Sulfamethoxazole zu 24%, Diclofenac und Roxithromycin zu 33%).

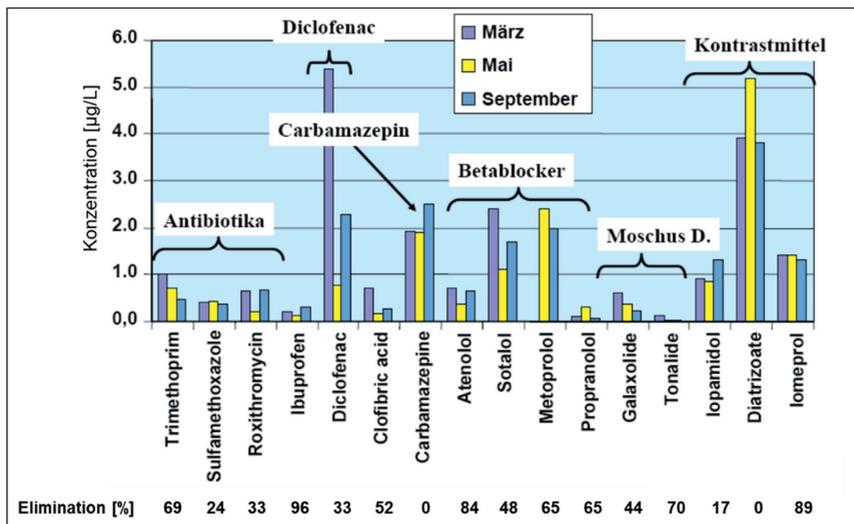


Abb. 10. Arzneimittelrückstände in gereinigtem Kläranlagenablauf (nach: Ternes, 2007). [17]

Sind diese Konzentrationen an pharmazeutisch aktiven Substanzen im Ablauf von Kläranlagen überhaupt bedenklich? Hierfür wurden die maximal gemessenen Konzentrationen der Arzneimittelrückstände in Kläranlagenabläufen mit ihren chronischen Toxizitäten auf verschiedene aquatische Organismen im möglichen Vorfluter gegenübergestellt. Dabei wurden die LOEC (Lowest Observed Effect Concentration) als Vergleichsmaßstab genommen. Denn direkt am Ablauf im Vorfluter können diverse Organismen im Wasser und Sediment angesiedelt und damit der Ablaufkonzentration direkt ausgesetzt sein (Abb. 11). [18] In den meisten Fällen der Arzneimittelrückstände und der exponierten Organismen liegen ein bis zwei Zehner-Potenzen für eine LOEC-Überschreitung, aber bei Diclofenac wird die LOEC für Fische bereits teilweise überschritten.

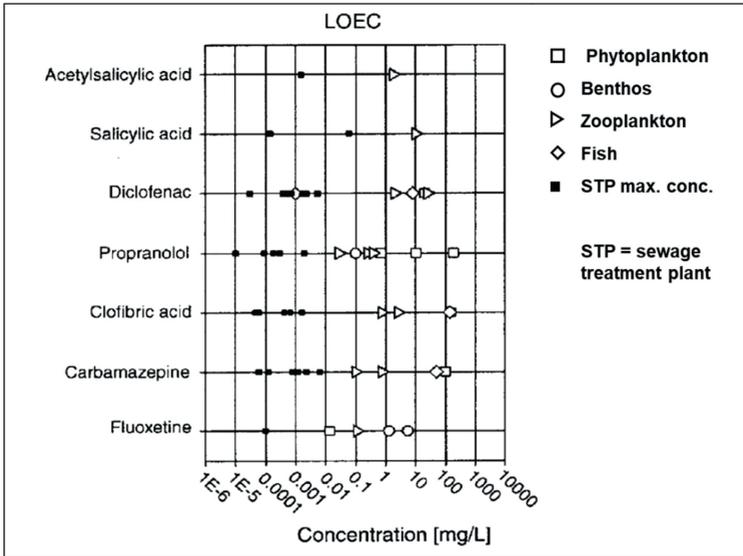


Abb. 11. Vergleich maximaler Arzneimittelrückstände in Kläranlagenabläufen mit chronischer Toxizität einiger aquatischer Organismen (Quelle: Fent, 2006). [18]

Die möglichen adversen Effekte von Arzneimittelrückständen in der Umwelt sind bei (i) *Antibiotika* die Bildung von resistenten Krankheitserregern, (ii) *Narkotika und Sedativa* die Veränderung des Lebensrhythmus der Organismen, Störung der Räuber-Beute-Beziehungen und Enzyminduktion zur Metabolisierung von Schadstoffen, (iii) *Desinfektionsmitteln* die Beeinträchtigung der Mikrobiologie in Kläranlagen und oft mutagene Wirkungen, (iv) *Sexualhormonen* die Reduzierung der Fertilitätsrate, Veränderung der Geschlechterverhältnisse und Missbildung der Genitalorgane, und (v) *Zytostatika* die zelltoxische Wirkung auch bei Nichtzielorganismen und oft starke kanzerogene, mutagene und teratogene Wirkungen.

Während Pflanzenschutzmittel vor ihrer Zulassung einer umfangreichen Prüfung insbesondere ihrer Umweltwirkungen unterzogen werden, wurden die möglichen adversen Effekte von Human- und Veterinärpharmaka auf die Umwelt in der Vergangenheit kaum untersucht. Eine regelhafte Zulassung nach ihren Umweltaspekten vor Inverkehrbringen fand nicht statt.

Aufgrund der zuvor genannten Umweltaspekte wurde in der EMA (European Medicines Agency) ein formelles Prüfprotokoll für Human- und Veterinärpharmaka erarbeitet (Abb. 12 und 13).

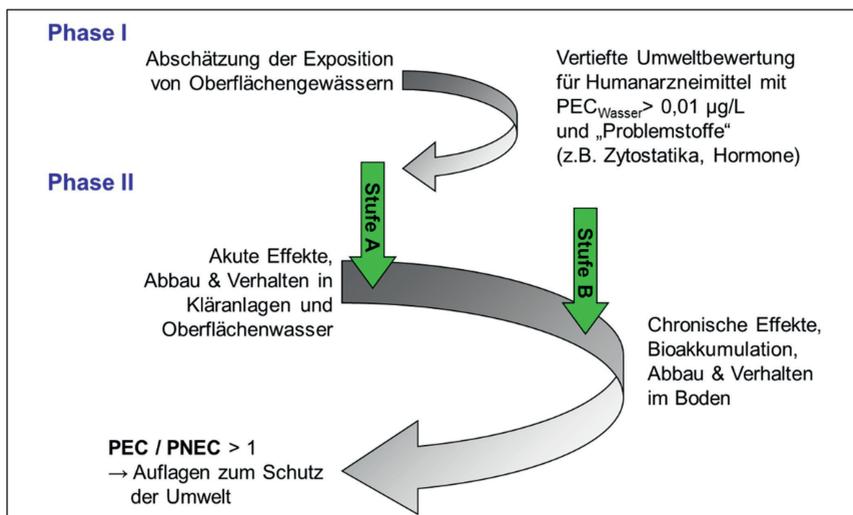


Abb. 12. Abschätzung der Umweltgefährdung durch Humanpharmaka:

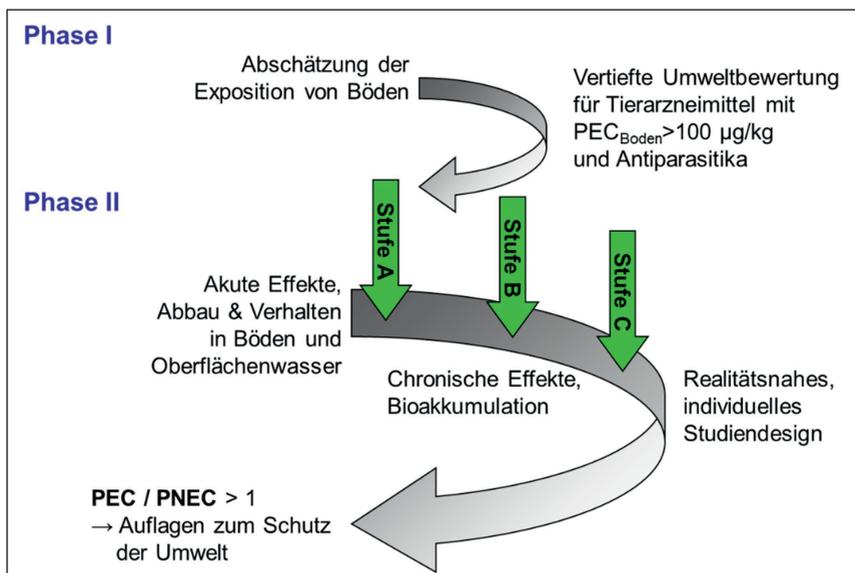


Abb. 13. Abschätzung der Umweltgefährdung durch Veterinärpharmaka:

Das Grundprinzip für beide Anwendungsgebiete ist gleich. Die Exposition der bei der EMA zu registrierenden Substanzen wird in einer **Phase I** in Bezug auf die in-

frage kommenden Umweltmedien abgeschätzt (PEC = Predicted Environmental Concentration).

Diese sind im Fall von Humanpharmaka die Oberflächengewässer, die durch Kläranlagenabläufe kontaminiert werden können, und im Fall der Veterinärpharmaka Böden, die durch Gülleausbringung den Substanzen exponiert werden. PEC kann aus physikalisch-chemischen Stoffeigenschaften und Laborexperimenten abgeschätzt (predicted) werden. Sollte diese Abschätzung einen höheren Wert ergeben als $PEC_{\text{Wasser}} > 0,01 \mu\text{g/L}$ für Humanpharmaka im Wasser bzw. $PEC_{\text{Boden}} > 100 \mu\text{g/L}$ für Veterinärpharmaka in Böden, so sind diese Substanzen in einer **Phase II** eingehender, z. T. unter praxisnahen Bedingungen zu untersuchen. Die 10.000fach höhere PEC für Böden als für Wasser ist damit begründet, dass die Arzneimittelrückstände durch Adsorption an Bodenpartikel und Huminstoffe weit weniger bioverfügbar sind, als in gelöstem Zustand im Wasser. Für Problemstoffe wie Zytostatika und endokrine (hormonaktive) Substanzen in Wasser sowie Antiparasitika in Böden gelten keine PEC-Abschätzungen, da die Ersteren selbst in geringsten Konzentrationen bereits zelltoxische bzw. hormonelle Effekte auslösen und die Letzteren die Bodenfauna beeinträchtigen können, die für die Bodenfruchtbarkeit von großer Bedeutung sind.

Die **Phase II**-Untersuchungen dienen zur Abschätzung der akuten (Stufe A) und chronischen Effekte und des Abbau- bzw. Akkumulationsverhaltens (Stufe B) in den Target Medien Wasser und Boden, um daraus die voraussichtlich unbedenkliche Konzentration (Predicted No Effect Concentration) zu ermitteln. Dann werden PEC und PNEC miteinander in Beziehung gesetzt. Ist $PEC/PNEC < 1$, bedeutet es, dass die voraussichtlich in der Umwelt zu erwartende Konzentration keine nachteiligen Effekte bei schutzbedürftigen Organismen auslösen können. In diesem Fall werden die Substanzen ohne Auflagen zugelassen. Im umgekehrten Fall, wenn also $PEC/PNEC > 1$ ist, ist mit nachteiligen Effekten auf eben diese Organismen zu rechnen, denen man mit Zulassungsaufgaben begegnen wird. Je größer dieser Wert liegt, desto schärfere Auflagen werden erlassen, bis hin zur Nichtzulassung der betreffenden Substanzen.

6 Hochschulexzellenz in der Entwicklungszusammenarbeit (*Exceed*)

Während die Probleme der Versorgung mit qualitativ hochwertigem Süßwasser in den entwickelten Ländern des Westens überwiegend gelöst zu sein scheinen, sind die Verfügbarkeit, Nutzung, Behandlung und Wiederverwendung von Süßwasser auf absehbare Zeit zentrale Probleme der Entwicklungs- und Schwellenländer, also des Globalen Südens. Aufgrund des anhaltenden Bevölkerungswachstums nimmt der weltweit verfügbare Wasservorrat pro Kopf immer weiter ab. Diese Tendenz wird dadurch verschärft, dass das verfügbare Wasser ungleich

verteilt ist. Weltweit haben über 700 Millionen Menschen keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser, und 3,5 Milliarden Menschen haben keine sichere Sanitärversorgung und Abwasserbehandlung. Dabei ist Hygiene unerlässlich für die Vermeidung von Infektionskrankheiten und die Pandemieprävention. Nach WHO sind ca. 80% aller Krankheiten und 25 Mio. vorzeitige Todesfälle pro Jahr auf verunreinigtes Wasser zurückzuführen.

Das verfügbare Wasser wird infolge der Urbanisierung und Industrialisierung von ehemals rein agrarischen Regionen zusätzlich beansprucht und verunreinigt. Damit steht es für andere Nutzungsoptionen (Trinkwasser, Bewässerung, Aquafarming) nicht mehr oder nur noch eingeschränkt zur Verfügung. Die persönlichen Erfahrungen des Autors mit der hygienischen Situation und der Nutzung von z. T. ungeklärtem Abwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen in Entwicklungs- und Schwellenländern sind in den folgenden Bildern 1 und 2 für Vietnam und Jordanien (2005) und Konya/Türkei (2010) dargestellt. Auswirkungen der mangelnden Umwelthygiene zeigen sich nicht zuletzt an großen Epidemien in der Welt, wie z. B. dem Ebola-Ausbruch in 2014/2015 in Afrika, der neben medizinischen insbesondere mit hygienischen Maßnahmen wie der Ausgabe von einem Stück Seife pro Haushalt bekämpft wurde [19].



Bild 1. Hygienische Situation in den Entwicklungsländern;

Links: Küstenabschnitt in Südvietnam, Nha Trang;

Rechts: Zarqa River nördlich von Amman und Ablauf der Kläranlage Al Samra (© M. Bahadir).



Bild 2. Hygienische Situation in Schwellenländern; illegale Bewässerung von landwirtschaftlichen Feldern mit ungeklärtem Abwasser der Stadt Konya/TR vor dem Bau der Kläranlage im Jahr 2011; (© M. Bahadır)

N = Niederschläge; E = Evapotranspiration

Die Entwicklungszusammenarbeit mit Ländern der Dritten Welt wird für das BMZ vom DAAD im Rahmen seiner Programmarbeit umgesetzt. Im Zusammenhang mit der „Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder zur Förderung von Wissenschaft und Forschung an deutschen Hochschulen“ in den drei Förderlinien „Graduiertenschulen, Exzellenzcluster und Zukunftskonzepte“ 2005/2006 wurde vom DAAD 2009 das Programm „Hochschulexzellenz in der Entwicklungszusammenarbeit – Exceed“ ins Leben gerufen. „Ziel der Initiative ist es, die Hochschulen in den Bereichen Lehre, Forschung und Dienstleistung zu stärken, um gemeinsam wirkungsvolle und innovative Beiträge zur Verwirklichung der Entwicklungsziele der Vereinten Nationen zu leisten.“ [20] In den folgenden fünf Jahren entstanden mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) fünf weltweit kooperierende Netzwerke zu den thematischen Schwerpunkten: (i) Wasser- und Ressourcenmanagement, (ii) Menschenwürdige Arbeit, (iii) Ernährungssicherung, und (iv) Medizin“. Dieses Exceed-Programm wurde in den folgenden zwei Förderperioden von jeweils fünf Jahren mit denselben Projektnehmern auf insgesamt 15 Jahre verlängert. Zurzeit laufen die Projekte der ersten Förderperiode aus und neue Projekte werden in Angriff genommen, mit thematischem Wechsel und neuen Hochschulen als Projektnehmer. [21]

Der Antrag der TU Braunschweig „EXCEED – Excellence Center for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries“

(Exceed SWM) war eines dieser ersten fünf Projekte, die in einem zweistufigen, mit der Exzellenzinitiative des Wissenschaftsrats vergleichbaren, Verfahren ausgewählt und gefördert wurden. Ursprünglich dem Millennium Development Goal MDG 7/C gewidmet („*Bis 2015 den Anteil der Menschen um die Hälfte senken, die keinen nachhaltigen Zugang zu einwandfreiem Trinkwasser und grundlegenden sanitären Einrichtungen haben*“), wurden im Zuge der Evaluation des DAAD-Programms und der weiteren zweimaligen Verlängerung der beteiligten fünf Projekte in Braunschweig, Kassel, Köln, Hohenheim und München um jeweils weitere fünf Jahre nunmehr die SDGs (Sustainable Development Goals), an der TU Braunschweig insbesondere das SDG 6, zugrunde gelegt: „*Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten.*“ [22]. Das Braunschweiger Exceed-Projekt, das Ende 2023 ausgelaufen ist, war ein Netzwerk von über dreißig Hochschulen in achtzehn Ländern und vier Kontinenten, das von der TU Braunschweig koordiniert und geleitet wurde.

7 EXCEED SWM – Excellence Center for Development Cooperation – Sustainable Water Management in Developing Countries

Das Exceed-Projekt an der TU Braunschweig begann im Sommer 2009 und wurde zunächst für fünf Jahre mit je einer Million Euro bis 2014 gefördert. Nach einer Zwischenevaluation nach drei Jahren sowie der Schlussevaluation in dessen letztem Jahr wurde das Projekt noch für jeweils zwei weitere fünf Jahre im gleichen finanziellen Umfang verlängert. Standen zu Beginn der ersten Förderperiode Aspekte des Netzwerkaufbaus und Etablierung von Forschungs- und Ausbildungsstrukturen mit den internationalen Partnern im Vordergrund, wurden die nachfolgenden Jahre der Netzwerkkonsolidierung und dem Aufbau von selbsttragenden Strukturen für einen Fortbestand des Netzwerks auch nach Auslauf der DAAD-Förderung gewidmet.

Das Projekt Exceed SWM (später zu SWINDON umbenannt) verfolgte einen ganzheitlichen interdisziplinären Ansatz unter Beteiligung von Umweltingenieuren, Umweltwissenschaftlern sowie Sozial-, Politik- und Kulturwissenschaftlern beim nachhaltigen Umgang mit limitierten Wasserressourcen und der kaskadischen Nutzung von gereinigtem Abwasser für die Bewässerung in der Landwirtschaft, zumal der Landwirtschaftssektor mehr als zwei Drittel des Süßwasserverbrauchs in diesen Ländern verursacht.

Aufgabe der Umweltingenieure ist, die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasserressourcen, die Versorgung der Bevölkerung und der Industrie mit sauberem Süßwasser, Entsorgung und Behandlung von Abwässern sowie deren Weiternutzung z. B. in der Landwirtschaft zu gewährleisten. Umweltwissenschaftler übernehmen

die Aufgabe der Qualitätskontrolle der Abwasserbehandlung und der Bewässerungsmaßnahmen sowie der Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit, um durch Rückmeldung die vorgelagerten Behandlungstechnologien zu optimieren. Die Sozial-, Politik- und Kulturwissenschaften untersuchen die administrativen und ökonomischen Randbedingungen bei der Implementierung sowie die Akzeptanz bzw. bestehende Vorbehalte in der Bevölkerung beim Konsum von Waren, die mit gereinigtem Abwasser produziert wurden. Schließlich werden die gesammelten Erfahrungen in Bildungs- und Informationsmaterialien eingesetzt, die auf unterschiedlichen Ebenen zum Einsatz kommen, von Schulen bis zu Höheren Bildungseinrichtungen und Universitäten, staatlichen Ämtern und Organisationen sowie unterschiedlichen gesellschaftlichen Akteuren (Abb. 14).



Abb. 14. Das Konzept des Exceed SWM-Projektes der TU Braunschweig 2009-2023.

Das Exceed SWM (SWINDON) verfolgte das Ziel, (i) Capacity Building in Entwicklungsländern (EL) und in Deutschland (GER) zur Nachhaltigen Wasserwirtschaft zu fördern, (ii) Nachhaltige Wasserwirtschaft auf die politische Agenda in EL und GER zu setzen, und (iii) bei Millennium bzw. Nachhaltigkeits-Entwicklungszielen (MDGs, SDGs) eine Kooperation mit EL auf Augenhöhe aufzubauen. Die dabei verfolgten Strategien waren (iv) Bildung eines globalen Netzwerkes, (v) Einrichtung von neuen und Aktualisierung von bestehenden Studienprogrammen in EL, (vi) Einwerbung und Durchführung von gemeinsamen Forschungsprojekten mit Partnerhochschulen, (vii) Entwicklung von geeigneten Weiterbildungsstudien in EL, und (viii) Bildung eines Pools von Experten in EL auf dem Gebiet der Nachhaltigen Wasserwirtschaft.

Die internationalen Partner im Exceed SWM-Projekt waren in vier regionalen Netzwerken Latein Amerika (LA), Naher und Mittlerer Osten und Nord-Afrika (MENA), Sub-Sahara-Afrika (SSA) und Südost-Asien (SEA) organisiert. Die regionale Kooperation wurde von jeweils einem Regionalkoordinator aus einer dieser Partnerhochschulen koordiniert. Somit hatten die Regionalen Netzwerke eine hohe Autonomie in Planung und Durchführung von Nachhaltigkeitsprojekten, deren Arbeit vom Exceed SWM-Kompetenzzentrum an der TU Braunschweig unterstützt wurde. Die letztliche Verantwortung in Finanzangelegenheiten und der Zielerreichung gegenüber dem DAAD oblag naturgemäß der Zentralen Projektleitung an der TU Braunschweig. Das gesamte Exceed SWM-Netzwerk der ersten Förderperiode 2009–2014 ist in Abb. 15 dargestellt, das in der Folgezeit einer dynamischen Entwicklung unterlag.

Im Vordergrund der Netzwerkarbeit stand Capacity Building durch Hochschul-ausbildung. Damit werden Kompetenzen künftiger Experten und Entscheidungsträger auf dem Gebiet Nachhaltige Wasserwirtschaft und gesellschaftspolitische Entwicklungsprozesse geschult und fortgebildet. Beispielhaft werden die Netzwerkveranstaltungen im Jahr 2013 aufgeführt, die in vergleichbarer Form und Umfang auch in den Folgejahren stattfanden:

- Summer School „New Alternative Sanitation Systems“ (Braunschweig)
- Summer School „Coastal Erosion and Management for Safer Coasts in a Changing Climate“ (Recife, Brazil)
- Expert Seminar „Water Issues in Mega Cities“ (Ho Chi Minh City, Vietnam)
- Regional Workshop „Management of Hydrological Systems in Arid and Semi-Arid Regions“ (Karak/Amman, Jordan)
- Regional Workshop „Water and Energy“ (Hanoi, Vietnam)
- Regional Workshop „Wastewater Treatment and Reuse“ (Konya, Turkey)
- Expert Workshop „Transboundary River Basins in Africa – Example of the Volta River Basin“ (Braunschweig)
- Regional Training Course „Wastewater Management“ (Zomba, Malawi)

Eine herausragende Veranstaltung war das UNESCO/DAAD/EXCEED SWM Konferenz „Water in Africa“ im Oktober 2012 in Kisumu/Kenya. Dieses Symposium, das vom Exceed-Netzwerk Sub-Sahara-Afrika organisiert wurde, brachte neben Exceed SWM-Mitgliedern auch DAAD-Alumni aus ganz Afrika und Experten und Gäste der UNESCO Nairobi zusammen, um über Probleme und angepasste Lösungen des Managements von Wasserressourcen, der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung auf diesem Kontinent zu diskutieren und *Best Practice* Beispiele zu präsentieren.

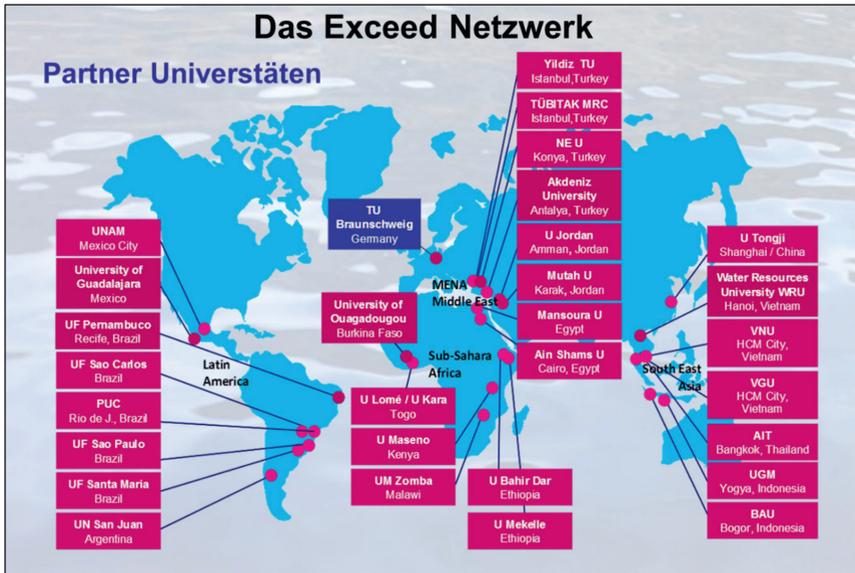


Abb. 15. Das Exceed SWM-Netzwerk 2009-2014.

Zur Hochschulausbildung der Nachhaltigen Wasserwirtschaft gehören auch Studiengänge, die dem Bedarf der Länder an Wasserexperten gerecht werden. Hierfür wurden in einer Curriculum-Datenbank (CDB) die bestehenden Lehrpläne aller Exceed SWM-Mitgliedsuniversitäten gesammelt, ausgewertet und ein Modellcurriculum für einen Master-Studiengang entwickelt, das schließlich an der Universität Mekelle in Äthiopien zur Einrichtung eines neuen Studiengangs verwendet wurde. Studenten mit Bachelor-Abschluss in Ingenieur-, Natur- und Managementwissenschaften werden dort in einem zweijährigen Masterstudium als Wasser-Experten ausgebildet. Dieses fortschrittliche Studienmodell wurde von der UNESCO mit der Einrichtung einer „UNESCO Chair in Water Resources, Planning and Environmental Engineering“ 2016 an der Ethiopian Institute of Technology, Mekelle University, Ethiopia ausgezeichnet. [23] Dieses Modell-Curriculum und die zugrunde liegende Datenbank (CDB) wurden an anderen Partner-Universitäten ebenfalls als Benchmark für die Optimierung der eigenen Ausbildungspläne verwendet (Abb. 16).

Undergraduate in	Engineering	Science	Socio-Economics
Advanced Courses	50 – 70%	50 – 70%	50 – 70%
Introductory Courses	15 - 20%	15 - 20%	15 - 20%
Introductory Courses	15 - 20%	15 - 20%	15 - 20%
Joint Group Work	5 - 10%	5 - 10%	5 - 10%
2nd Year Theses	in own Disciplin	in own Disciplin	in own Disciplin

Abb. 16. MSc-Curriculum in Nachhaltiger Wasserwirtschaft, entwickelt für die Universität Mekelle/Äthiopien, für Studenten mit unterschiedlichem Bachelor-Abschluss.

Die in diesem Modellstudium behandelten Themenfelder waren auch die Basis für Forschungskoperationen und gemeinsame Projekte der Exceed SWM-Partner in (i) Wasserwissenschaft und Ingenieurwesen; (ii) Biologische und Ökologische Aspekte von Wasser, Gesundheit und Ernährung; (iii) Chemische Aspekte von Wasser, Umwelt und anthropogene Wechselwirkungen; (iv) Wasserwirtschaft aus dem Blickwinkel der Sozial-, Politik- und Rechtswissenschaften.

Die Ziele dieses Projektes werden in Abb. 17–19 zusammenfassend dargestellt.

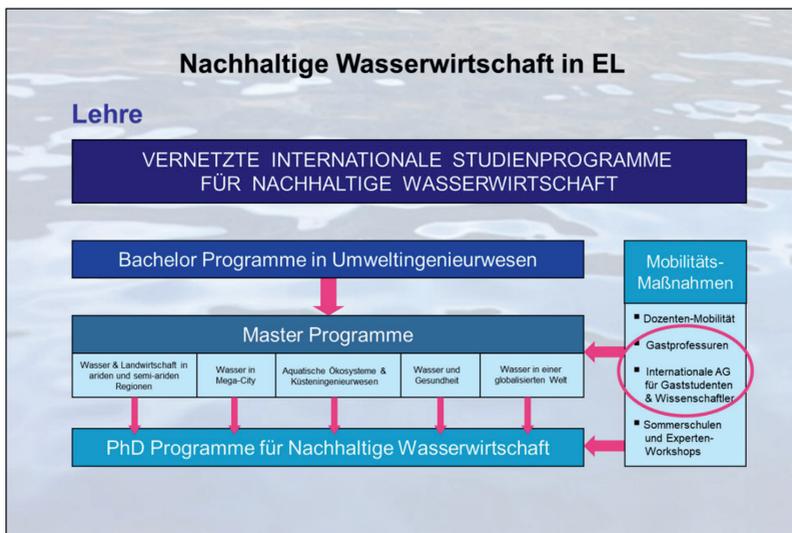


Abb. 17. Das Lehr-Konzept des Exceed SWM-Projektes.

Nachhaltige Wasserwirtschaft in EL

Forschungsfelder

- WASSER UND LANDWIRTSCHAFT IN ARIDEN UND SEMIARIDEN REGIONEN**
 - Integrierte Wasserwirtschaft
 - Methoden der Modellierung
 - Sozio-ökonomische Voraussetzungen
- WASSER IN DER URBANEN WELT**
 - Kommunale Wasserversorgung
 - Abwasser- und Abfallwirtschaft
 - Numerische Modelle
 - Sanierung von Altlasten
- WASSER UND ÖKOSYSTEME**
 - Climate Change
 - Biodiversität
 - Überwachung aquatischer Ökosysteme
 - Schadstoff-Einträge
 - Konsequenzen und Risiken von Hochwasser
- WASSER UND GESUNDHEIT**
 - Ressourcen-Schutz
 - Wasser- und Abwasser-Hygiene
 - Risikoperzeption und -bewertung
- WASSER IN DER GLOBALEN WELT**
 - Climate Change
 - Verteilung der Wasser-Reserven
 - Neue Technologien zum Schutz von Binnen- und Küstengewässern

Abb. 19. Transfermaßnahmen im Rahmen des Exceed SWM-Projektes.

Nachhaltige Wasserwirtschaft in EL

Transfermaßnahmen

- WISSENSTRANSFER**
 - Beratung für Start Ups
 - Coaching für Existenzgründer
 - Networking
 - Unterstützung bei Förderanträgen
- TRAIN THE TRAINER**
 - Gemeinsame Drittmittel-Forschung
 - Consulting
 - Hilfe bei Patent Anmeldungen
- KOOPERATION MIT DER INDUSTRIE**
 - Exkursionen
 - Industriepraktika
 - Langfristige Kooperationen
- STRUKTUREN UND NETZWERKE**
 - International Career Service
 - Wissenschaftliche Konferenzen
 - Fortbildung für Berufstätige
 - Netzwerkbildung unter Projektpartnern und mit anderen

Abb. 19. Transfermaßnahmen im Rahmen des Exceed SWM-Projektes.

8 Conclusio – oder „Warum machen wir das Ganze?“

Globale Probleme machen keinen Halt vor nationalen Grenzen. Das zeigt sich gerade besonders deutlich in der weltweiten Migration insbesondere aus den Krisengebieten des Nahen und Mittleren Ostens und Afrikas in die EU. Hunderttausende von Flüchtlingen machen sich unter Lebensgefahr und der Inkaufnahme großer Entbehrungen auf den Weg nach Europa. Sie tun dies, um ein wenig mehr Menschenwürde und Lebensqualität für sich und ihre daheim gebliebenen Familien zu erreichen. Die weltweite Migration aus dem Globalen Süden in die entwickelten Länder des Westens ist oft eine Folge der mangelnden Sicherheit und Prosperität zu Hause. Aber in Folge des Klimawandels wird auch der Globale Westen bald mit ähnlichen Problemen konfrontiert, wie sie sich im Globalen Süden bereits dramatisch zeigen. Es müssen also dringend Lösungen erarbeitet werden, die die Entwicklung zu einem menschenwürdigen Dasein in diesen Ländern ermöglichen. Nur eine globale Vernetzung und Wissenstransfer helfen, solche Lösungswege zu erarbeiten. Denn kein Mensch verlässt freiwillig seine angestammte Heimat, wenn er nicht dazu gezwungen ist. Investition in Entwicklungszusammenarbeit ist also ein gut angelegtes Kapital.

Die TU Braunschweig steht auf den drei Säulen Lehre, Forschung und Internationalität. Unsere Universität hat ein umfangreiches Netzwerk an internationalen Alumni, und die interdisziplinäre weltweite Kooperation kann auf gegenseitigem Vertrauen aufbauen. Auch haben die Stadt und Region Braunschweig langjährige Erfahrungen mit umweltverträglichem Recycling von gereinigtem Abwasser in der Landwirtschaft als eine der wenigen Regionen in Deutschland. Im Rahmen dieses Exceed SWM-Projektes wurden zahlreiche internationale Partner von Hochschulen, Behörden und der Wasserwirtschaft mit dem Konzept der Abwassernutzung in der Landwirtschaft einschließlich der darin enthaltenen Nährstoffe Nitrat und Phosphat vertraut gemacht, sei es durch Einladung nach Braunschweig, sei es auf Konferenzen und Workshops in den Herkunftsländern.

Das Braunschweiger Modell des Abwasser-Recyclings mit allen Begleitmaßnahmen der Vermeidung von Schadstoffeinträgen in das Rohabwasser, Methoden der Überwachung und Kontrolle der Abwasserqualität vor und nach der Reinigung in der Kläranlage und Überprüfung der Umweltauswirkungen auf Grundwasser und die landwirtschaftlichen Böden könnte tatsächlich ein *Best Practice Model* für Länder des Globalen Südens aber auch für EU-Anrainerstaaten des Mittelmeeres darstellen, deren Wasserprobleme von denen des Globalen Südens gar nicht so weit verschieden sind.

Literatur

- [1] Deutsche UNESCO Kommission, UN-Weltwasserbericht 2024, Pressemitteilung vom 22.03.2024; <https://www.unesco.de/kultur-und-natur/wasser-und-ozeane/un-weltwasserbericht-2024-wasser-fuer-wohlstand-und-frieden>
- [2] Klimawandel-Wiki: Wasserkreislauf; (*accessed: 24.03.2024*) <https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Wasserkreislauf>
- [3] FAO: The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – System at Breaking Point. Synthesis Report 2021, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- [4] Umweltbundesamt, 2019: Wasserdargebot und Wassernutzung 2019; <https://www.umweltbundesamt.de/bild/wasserdargebot-wassernutzung-2019>
- [5] GIZ – Deutsche Gesellschaft für Wirtschaftliche Zusammenarbeit: Wasser in der Landwirtschaft (2018). <https://www.giz.de/fachexpertise/html/60133.html>
- [6] M. Bahadır, M.E. Aydin, S. Aydin, F. Beduk, M. Batarseh: Wastewater Reuse in Middle East Countries – A Review of Prospects and Challenges. *Fresenius Environmental Bulletin* 25, 1284–1304 (2016)
- [7] Planet Wissen: Konfliktstoff Wasser; Der Jordan – wie Israel das Wasser abgräbt (22.03.2021); <https://www.planet-wissen.de/natur/umwelt/wassernot/pwiekonfliktstoffwasser100.html#Jordan>
- [8] Global Nature Fund: Living Lakes, Dead Sea – Israel, Jordan, Palestine. (*accessed: 24.03.2024*) <https://www.globalnature.org/en/living-lakes/asia/the-dead-sea>
- [9] W. Struminski: Israel bringt Wirtschaftsprojekte mit Jordanien voran. GTAI – German Trade and Invest, 08.08.2022; <https://www.gtai.de/de/trade/israel/wirtschaftsumfeld/israel-bringt-wirtschaftsprojekte-mit-jordanien-voran-879172>
- [10] Welt Hungerhilfe: Wasser ist ein Menschenrecht (2023). <https://www.welt-hungerhilfe.de/informieren/themen/fuer-wasser-und-hygiene-sorgen/wasser-menschenrecht>
- [11] BMZ – Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Folgen des Klimawandels (25.09.2023). <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/folgen-des-klimawandels-124774>
- [12] IKSR Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: Die Biologie des Rheins, Synthesebericht zum Rhein-Messprogramm Biologie 2018/2019 und nationale Bewertungen gemäß WRRL S. 24; https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/DE/rp_De_0280.pdf
- [13] BAFG – Bundesanstalt für Gewässerkunde: (*accessed: 24.03.2024*) <https://geoportal.bafg.de/dokumente/had/79BiologischeGewaesserguete.pdf>;
- [14] VwVwS: Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe; (*accessed: 24.03.2024*) https://www.umwelt-online.de/recht/wasser/whg/wgk_vwv/wgkk_ges.htm;

- [15] LAWA – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Bericht zur Grundwasserbeschaffenheit – Pflanzenschutzmittel, S. 14; 20. Mai 2010; https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2011_1.pdf;
- [16] T.A. Ternes: Occurrence of Drugs in German Sewage Treatment Plants and Rivers. *Water Research*, 32(11), 3245–3260 (1998)
- [17] T.A. Ternes, M. Bonerz, N. Herrmann, B. Teiser, H.R. Andersen: Irrigation of Treated Wastewater in Braunschweig, Germany: An Option to Remove Pharmaceuticals and Musk Fragrances. *Chemosphere* 66(5), 894–904 (2007)
- [18] K. Fent, A.A. Weston, D. Caminada: Ecotoxicology of Human Pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, 76(2), 122–159 (2006)
- [19] Robert Koch Institut: Informationen zum Ebolafieber-Ausbruch in Westafrika 2014/2015, (Stand 30.03.2016) http://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/E/Ebola/Kurzinformation_Ebola_in_Westafrika.html
- [20] DAAD (2016): Hochschulexzellenz in der Entwicklungszusammenarbeit – Exceed, https://www.daad.de/der-daad/unsere-aufgaben/entwicklungszusammenarbeit/foerder_programme/hochschulen/infos/de/43947-hochschulexzellenz-in-der-entwicklungszusammenarbeit-exceed/
- [21] DAAD (2023): Hochschulexzellenz in der Entwicklungszusammenarbeit – Exceed, <https://www.daad.de/de/infos-services-fuer-hochschulen/weiterfuehrende-infos-zu-daad-foerderprogrammen/exceed/>
- [22] BMZ – Bundesministerium für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: Die globalen Ziele für nachhaltige Entwicklung, Ziel 6: Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten. (2017) http://www.bmz.de/de/ministerium/ziele/2030_agenda/17_ziele/ziel_006_wasser/index.html
- [23] UNESCO: Water-Related UNESCO Chairs (2023); <https://www.unesco.org/en/ihp/chairs>

80 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

KOLLOQUIUM

Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel
im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte

Veranstaltungstag: Donnerstag, 30. November 2023, 9.30 bis 12.00 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Veranstaltungsort: BWG-Haus
Fallersleber-Tor-Wall 16
38100 Braunschweig

9.30 Uhr **Begrüßung:** Prof. Dr. Reinhold Haux
Präsident der BWG

9.45 Uhr **Vortrag:** Prof. Dr. Ulrich Menzel
TU Braunschweig, Department Sozialwissenschaften
Das Selbstverständnis der BWG zwischen Kontinuität und Wandel
im Verlauf ihrer 80-jährigen Geschichte

10.30 Uhr **Kommentar zum Vortrag:** Dr. Brage bei der Wieden
Niedersächsisches Landesarchiv, Leiter der Abteilung
Wolfenbüttel

10.45 Uhr **Kommentar zum Vortrag:** Prof. Dr. Christian Kehrt
TU Braunschweig, Institut für Wissenschafts- und
Technikgeschichte

11.00 Uhr **Kommentar zum Vortrag:** Dr. Henning Steinführer
Stadt Braunschweig, Leiter des Stadtarchivs

11.15 Uhr **Kommentar zum Vortrag:** Prof. Dr. Bettina Wahrig
TU Braunschweig, Abteilung für Geschichte der Naturwissen-
schaften mit Schwerpunkt Pharmaziegeschichte

11.30 Uhr **Diskussion, Moderation:** Prof. Dr. Harald Budelmann
Vizepräsident der BWG

FESTVERANSTALTUNG

80 Jahre

Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Aufgaben von Universitäten und Gelehrtenvereinigungen
Aktuelle Standortbestimmung. Chancen, Herausforderungen,
Erwartungen

Veranstaltungstag: Donnerstag, 30. November 2023, 14.00 bis 16.00 Uhr

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Veranstaltungsort: Aula der TU Braunschweig
Pockelsstraße 11
38106 Braunschweig

Eröffnung:

Prof. Dr. Reinhold Haux
Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Begrüßung und Moderation:

Prof. Dr. Janina Bahnemann
Universität Augsburg, Institut für Physik,
Sprecherin der Jungen BWG 2019–2022

Perspektive Politik:

Prof. Dr. Joachim Schachtner
Staatssekretär im Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur
80 Jahre und das Wichtigste kommt noch? Die Rolle der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft in der Zukunft

Perspektive Universitäten:

Prof. Dr. Volker Epping

Präsident der Leibniz Universität Hannover

Das Verhältnis von Universitäten und Akademien aus der historischen Perspektive

Prof. Dr. Angela Ittel

Präsidentin der Technischen Universität Braunschweig

Synergien zwischen wissenschaftlichen Gesellschaften und Universitäten vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Herausforderungen

Dr. Sylvia Schattauer

Präsidentin der Technischen Universität Clausthal

Gesamtgesellschaftliche Aufgaben für die Transformation der energieintensiven Industrien – Sicherstellung Energie/Rohstoffe/Fachkräfte

Perspektive Gelehrtenesellschaften:

Prof. Dr. Daniel Göske

Präsident der Niedersächsischen Akademie der Wissenschaften zu Göttingen

Learned Societies: Wie, wem und wozu Gelehrtenesellschaften dienen

Prof. Dr. Reinhold Haux

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Technik im Wandel – Gesellschaften/Lebenswirklichkeiten im Wandel: Beiträge von Gelehrtenesellschaften?

Schlussworte:

Prof. Dr. Thomas Hanschke

Präsident der Technischen Universität Clausthal 2009–2018

Zu diesem Jubiläum wird eine Festschrift mit dem Titel

80 Jahre Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Ihre Rolle als Gelehrtenesellschaft und ihr Selbstverständnis

erscheinen. Herausgeber sind Reinhold Haux und Ulrich Menzel.

KOMMISSIONEN UND QUERSCHNITTSBEREICHE

BWG-Querschnittsbereich zur Sammlungsforschung

RECOLLECT

NICOLE C. KARAFYLLIS

(Sprecherin von RECOLLECT), Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften
Institut für Philosophie, TU Braunschweig, Bienroder Weg 80, D-38106 Braunschweig, E-Mail: n.karafyllis@tu-braunschweig.de

1 Aktivitäten

Das Jahr 2023 stand für RECOLLECT forschersich im Zeichen der Reflexion der Restitutionsdebatte um die von Deutschland an Nigeria zurückgegebenen Benin-Bronzen (textbasierte Diskussion am 2. Juni 2023 im BWG-Haus)¹ sowie der Weiterführung der Konzept-Arbeit um das Verhältnis von *Migration* und Sammlungsobjekt (Treffen am 21. Juli 2023 im BWG-Haus). Die Frage, was genau ein Sammlungsobjekt ist, wurde als interdisziplinäre Kernfrage für die nächste Zeit identifiziert, inklusive seiner Präsentation, seines Besitzes, seiner Migration und seiner Erhaltung.

Im ersten Teil wurden folgende Theoriebestandteile einer objektorientierten Sammlungsforschung diskutiert: Text/Kontext vs. Genealogie/Bedeutung des Objekts, Materialität vs. Virtualität, Einzelobjekt vs. Serie, Erinnerungskulturen im In- und Ausland und ihre gegenseitige Durchdringung, Historizität der Sammlungsethik (Bsp.: Sklavenhandel) sowie gesellschaftliche Vorurteile zur Sammlungspraxis (z. B.: ein Objekt im Museum bedeute automatisch dessen Zugänglichkeit).

Das Ziel, sowohl Theoriearbeit zur Sammlungsforschung zu leisten wie auch die regionalen Sammlungen sichtbarer zu machen, wird weiterhin als attraktiv und nun nach Abklingen der Pandemie wieder als gut durchführbar erachtet. Natürlich müssen die weitreichenden Ausstellungskalender erst justiert werden. Es gibt die Möglichkeit zu vielfältigen Formen der Zusammenarbeit auch mit weiteren Institutionen. Präsident Haux nahm an den Sitzungen des Querschnittsbereichs selbst teil und sagte ihm seine Unterstützung zu. Frau Karafyllis fertigte einen Text für

¹ Weiterführend erschien im Fortgang des Jahres das Buch von Patrick Bahners: *Kampagne in Deutschland*. Lüneburg: Springe 2023.

die Homepage der BWG an und nahm 2023 an der Arbeitsgruppe der WKN zu den Geistes-, Sozial- und Kulturwissenschaften in Niedersachsen in Hannover teil. Unter anderen sammlungsbezogenen Forschungen zum Kulturgut, Wissenschaftsforschung und Migrationsforschung werden Zukunftspotenziale attestiert.²

Auf der Juli-Sitzung diskutierte der Querschnittsbereich RECOLLECT zwei mögliche Objekte bzw. Objektgruppen für Ausstellungen zum Thema „Migration“, die auf reges Interesse stießen. Herr Joger erläuterte die Besonderheiten der Stellerschen Seekuh, von der das Staatliche Naturhistorische Museum in Braunschweig eines der nur 27 Skelette weltweit besitzt. Beschrieben wurde sie 1741 durch den Arzt und Naturforscher Georg Wilhelm Steller (1709–1746), Erforscher Alaskas und Sibiriens. Sie ist neuzeitlich ausgestorben und wurde in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts ausgerottet durch Pelzjagd (Robbenjäger, Walfänger). Rückzugsgebiet der Gabelschwanzseekühe mit dem einzigen noch lebenden Vertreter des Dugong wurde Kalifornien/Mexiko. Alle anderen Seekühe finden sich südlicher in tropischen Gebieten. Die Objektgeschichte führt nach Russland; ein Migrant aus Wladiwostok brachte das Skelett nach Braunschweig (Beleg im Nds. Landesarchiv Abteilung Wolfenbüttel). Bezüglich der Ausstellung handelt sich zwar um kein ‚neues‘ Objekt, sondern um ein Zugpferd, das aber im neuen Kontext präsentiert werden könnte, da 2022 das Genom entschlüsselt wurde und neue DNA-gestützte Erkenntnisse zur Migration vorliegen.³

Der zweite Objektvorschlag stammte von Brage Bei der Wieden und datierte noch früher. Abgefangen wurden brisante ‚Liebesbriefe‘ von Anna Sophia von Braunschweig-Wolfenbüttel (1598–1659) an Franz Albrecht von Sachsen-Lauenburg. Sie war seit 1614 wenig glücklich verheiratet mit Herzog Friedrich Ulrich von Braunschweig-Lüneburg. Dieser betrieb infolgedessen die Scheidung von seiner Ehefrau, was jedoch auch kaiserlich nicht erreicht werden konnte. Der Herzog starb erbenlos, das sog. Mittlere Haus Braunschweig starb aus, die südlichen Liegenschaften zerfielen, der Kleinstaat Braunschweig verblieb. Die südwestliche Linie schied zwar aus der Politik aus, blieb aber der Kultur erhalten. Abschriften der o. g. Briefe sind im Nds. Landesarchiv Abteilung Wolfenbüttel vorhanden.

Mitglieder von RECOLLECT konnten ferner eine englische und barrierearme Fassung ihres interdisziplinären Buches zu Sammlungen von 2022 publizieren:

Karafyllis, N. C./Overmann, J./Schneider, U. J./Mackert, Christoph (Eds.) (2023): *The contaminated library. Microbes in book culture*. Leipzig: Universitätsbibliothek Leipzig (*Schriften aus der Universitätsbibliothek Leipzig*, Bd. 52) (open access).

² WKN: Arbeitsgruppe Geistes-, Sozial- und Kulturwissenschaften. Bericht und Empfehlungen. Hannover: WKN November 2023. Zu RECOLLECT siehe S. 48, zur BWG allgemein S. 28.

³ Diana Le Duc et al.: Genomic basis for skin phenotype and cold adaptation in the extinct Steller’s sea cow. In: *Science Advances*. Band 8, Nr. 5, 2022, doi:10.1126/sciadv.abl6496

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-869219>

<https://doi.org/10.36730/2023.2.cl>

Dies erfolgte in Kooperation mit PD Dr. Christoph Mackert, Leiter des Handschriftenzentrums der Universitätsbibliothek Leipzig.

2 Hintergrund und Zielsetzung

Hauptaufgabe des Querschnittsbereichs RECOLLECT ist die transdisziplinäre Verständigung über Methoden, Objekte und Begriffe der Sammlungsforschung unter Einbindung regionaler Sammlungsinstitutionen und ihrer Bestände. Konzeptuell analysiert und weiter entwickelt werden Sammlungen, Sammlungsobjekte und das Sammeln selbst. Dazu gehören Vorstellungen von Sammlungen als Wissensspeicher, Erinnerungsorte oder kulturellem Erbe. Eine Besonderheit im Vergleich mit Sammlungsforschung andernorts: Natur- und kulturwissenschaftliche Sammlungen werden zusammen und jenseits etablierter Ressortlogiken betrachtet, z. B. Museen und Botanische Gärten, Archive und Genbanken. Die Region Braunschweig als Hort umfangreicher Sammlungen hat dafür sehr gute Voraussetzungen. Öffentlichkeitswirksame Verwertungsformen der gemeinsamen Arbeit sind v. a. Ausstellung, Workshop, Film und Text.

3 Mitglieder

Der Querschnittsbereich RECOLLECT arbeitet transdisziplinär. Seine ständigen Mitglieder sind: Brage Bei der Wieden (Archivwissenschaft/Geschichte), Peter Burschel (Geschichte, Bibliothekswissenschaft), Dietmar Brandes (Botanik), Thomas Döring (Kunstgeschichte), Ulrich Joger (Zoologie, Naturgeschichte), Nicole C. Karafyllis (Philosophie, Biologie), Jörg Overmann (Mikrobiologie), Henning Steinführer (Archivwissenschaft/Geschichte).

Damit sind folgende Sammlungsinstitutionen begründend am Querschnittsbereich beteiligt:

- Braunschweiger Stadtarchiv
- Niedersächsisches Landesarchiv Abteilung Wolfenbüttel
- Herzog August Bibliothek, Wolfenbüttel
- Herzog Anton Ulrich-Museum, Braunschweig
- DSMZ-Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig
- Staatliches Naturhistorisches Museum, Braunschweig
- Botanischer Garten der TU Braunschweig

Der Kreis wird je nach konkretem Forschungsthema um entsprechende Expertinnen und Experten sowie Sammlungen erweitert.

Junge BWG

Bericht zu den Aktivitäten in 2023

FELIX KASPAR, Vorsitzender der JBWG
STEFANIE KROKER, Stellv. Vorsitzende der JBWG
FRIEDERIKE HENDRIKS, Stellv. Vorsitzende der JBWG
ULRICH RÖMER, Medienmanager der JBWG

Neben den regulären Sitzungen veranstaltete die Junge BWG 2023 eine Informationsveranstaltung zur Beantragung von ERC Grants, bei dem Forscher*innen, die bereits eine Förderung erhalten haben, ihre Erfahrungen teilten. Zudem organisierte die Junge BWG ein eigenes Sommerfest.

Prof. Dr. Philipp Otto hat einen Ruf an die Universität Glasgow als Associate Professor (Reader) in Statistics and Data Analytics angenommen und ist seit dem 1. September 2023 an der School of Mathematics and Statistics der Universität Glasgow tätig.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Vowinkel ist seit dem 1. August 2023 Professor für Transportprozesse in Hydrosystemen.

Zudem ist Prof. Dr.-Ing. Gregor Wehinger seit Oktober 2023 Professor und Leiter des Instituts für Chemische Verfahrenstechnik am KIT.

Als neue Mitglieder konnten Prof. Maximilian Merkert, Juniorprofessor für Optimierung unter Unsicherheit in der Mobilität am Institut für Mathematische Optimierung der TU Braunschweig, sowie Prof. Matthias Bücker, Juniorprofessor am Institut für Geophysik und Extraterrestrische Physik der TU Braunschweig, gewonnen werden.

Die regulären Sitzungen fanden am 3. Februar, 14. April, 14. Juli und 24. November 2023 jeweils im hybriden Format statt. Neben der Planung von neuen Veranstaltungen und der Vorstellung und Aufnahme neuer Mitglieder gab Kathrin Dohnt mit ihrem Vortrag zum Thema „Biofilme – Anwendung und Vermeidung“ Einblicke in ihre aktuelle Forschung.

Am 1. September 2023 fand das Sommerfest der Jungen BWG statt. Wissenschaftlich standen spannende Vorträge aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz auf dem Programm. Prof. Tim Fingscheidt berichtete über die aktuellen technischen Möglichkeiten der generativen KI („From End-to-End Automatic Speech Recognition to ChatGPT: A Technical Journey“). Anschließend beleuchtete Dr. Esther Greussing aus der Jungen BWG Aspekte der Wissenschaftskommunikation („Wissenschaftskommunikation im Zeitalter künstlicher Intelligenz“).



Abb. 1. Gruppenbild im Rahmen der 16. Ordentlichen Sitzung der Jungen BWG am 24.11.2023.

Das Team der Jungen BWG besteht derzeit aus 29 engagierten jungen Wissenschaftler:innen mit verschiedenen fachlichen Hintergründen. Das Netzwerk dient unter anderem der Förderung und Unterstützung in der frühen Karrierephase. Zu den aktuellen Mitgliedern zählen (Stand Januar 2024):

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften:

Prof. Dr. Janina Bahnmann (Uni Augsburg, ehemals LU Hannover), Prof. Dr. Jakob Franke (LU Hannover), Dr. Felix Kaspar (Sprecher der Jungen BWG, TU Braunschweig), Prof. Dr. Philipp Klahn (Uni Göteborg, Schweden, ehemals TU Braunschweig), Dr. Björn Krenz (DSMZ Braunschweig), Prof. Dr. Stefanie Kroker (stellvertretende Sprecherin der Jungen BWG, TU Braunschweig), Prof. Dr. Philipp Otto (Universität Glasgow, ehemals LU Hannover), Dr. Maren Schubert (TU Braunschweig), Dr. Dennis Schlippert (Klassenvorsitzender Mathematik und Naturwissenschaften, LU Hannover), Prof. Dr. Timm Wilke (Uni Oldenburg), Prof. Dr. Antje Wulff (Uni Oldenburg), Dr. Michael Zopf (LU Hannover), Prof. Dr. Maximilian Merkert (TU Braunschweig), Prof. Dr. Matthias Bucker (TU Braunschweig).

Klasse für Ingenieurwissenschaften:

Dr. Susana Castillo (TU Braunschweig), Prof. Dr. Iordania Constantinou (TU Braunschweig), Dr. Katrin Dohnt (TU Braunschweig), Dr. Aidin Lak (TU Braunschweig), Dr. Inka Mai (TU Braunschweig), Prof. Dr. Christine Minke (TU Clausthal), Dr. Hannes Müller-Thomy (Klassenvorsitzender Ingenieurwissenschaften, TU Braunschweig), Prof. Dr. Ulrich Römer (Medienmanager der Jungen BWG, TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Bernhard Vowinckel (TU Dresden, ehemals TU Braunschweig), Prof. Dr. Gregor Wehinger (KIT, ehemals TU Clausthal).

Klasse für Geisteswissenschaften:

Dr. Jacob Blumenfeld (Uni Oldenburg), Dr. Friederike Hendriks (zweite stellvertretende Sprecherin der Jungen BWG, TU Braunschweig), Dr. Sebastian Huhnholz (Klassenvorsitzender Geisteswissenschaften, LU Hannover), Dr. Esther Greussing (TU Braunschweig), Dr. Alexander Waszynski (TU Braunschweig).

SOMMERFEST DER JUNGEN BWG
am 1. September 2023

From End-to-End Automatic Speech Recognition to ChatGPT: A Technical Journey

TIM FINGSCHIEDT, ZHENGYANG LI, TIMO LOHRENZ
Institut für Nachrichtentechnik der TU Braunschweig, Schleinitzstraße 22,
38106 Braunschweig

1 Introduction

Automatic speech recognition has suffered from mediocre performance in practical applications since decades. The July 2007 Gartner Hype Cycle on Human Computer Interaction has seen “speech recognition for mobile devices” just beyond the peak of inflated expectations, on the steep fall into the trough of disillusionment. Just within the trough, at that time, “speech recognition for the desktop” and “natural language search” have been allocated. Natural language information systems building upon (large) language models, such as ChatGPT, have not even been reported. Note that ChatGPT is largely different to just a search engine with natural language interface.

With the introduction of SIRI in 2011, Amazon Echo in 2014, and Google Home in 2016, however, speech technology has matured towards productivity: It started to make fun and became useful for a broad range of users (and therefore also for the respective manufacturers ...). The technology behind these automatic speech recognition (ASR) engines evolved from hidden Markov/Gaussian mixture models (HMM/GMM) towards so-called hybrid approaches, still residing on HMMs, but acoustic models replacing the GMM modeling with high-capacity deep neural networks (DNNs). In the meantime, so-called end-to-end automatic speech recognition has taken over the lead in top-performing ASR approaches, dropping also the HMM paradigm. “End-to-end” (E2E) means for ASR that there is a single DNN which reads in the speech signal from the user, and step-by-step delivers the recognized letters, one after the other. Miraculously, they form words and meaningful sentences, representing the spoken utterance with very high accuracy.

In this article, we focus on one of the three prominent architectures for end-to-end ASR, which is the attention-based encoder-decoder (AED) paradigm. It uses the so-called transformer technology that has been very successfully introduced also to many computer vision tasks and seems to overcome various limitations of convolutional neural networks (CNNs). In sequence tasks, such as speech technology in general, transformers also start to replace the formerly heavily used recurrent neural networks (long short-term memory, LSTM). In any case, it is worthwhile looking into AED models for speech. This article will give a high-level introduction into AED-based end-to-end ASR.

With the introduction of and free-of-charge access to ChatGPT version 3.5 in November 2022, another revolution in speech technology took place, creating immense awareness throughout the public. Many have experienced ChatGPT as a useful, sometimes funny companion which answers questions and can be really of help in many ways. ChatGPT revolutionizes business processes, replaces human workers in various ways, and start-ups emerge which offer support for such transition of using ChatGPT in one's own business, see, e.g., [1] (in German). Technically, ChatGPT resides on a large language model (LLM), equipped with output post-processing to improve *usefulness*, *honesty*, and *harmlessness* of the system output [15]. Keep in mind that ChatGPT raises ethical questions on bias, privacy and security, transparency, abuse, and authorship [17]. This list is not even complete. On the technical side, there is a strong link between ChatGPT and ASR systems, as both use language models.

In this article, we take the technical perspective and will recapitulate on a high level the AED approach to end-to-end ASR. We will show how such an ASR engine makes use of a language model (LM) and will emphasize that the actual AED ASR engine and its LM have close commonalities: They are both based on transformers. Finally, we will drop the ASR engine, focus on the language model only, and we will show how similar and simple the core LLM of ChatGPT is configured. We will discuss the early versions of ChatGPT and give examples on their training and practical uses. Section 2 provides a high-level overview of the article structure.

2 Article Outline: Birds' Eye View on Inputs and Outputs

In Figure 1, we display the inputs and outputs of the DNNs we focus on. It also provides the further structure of this article, as outlined below.

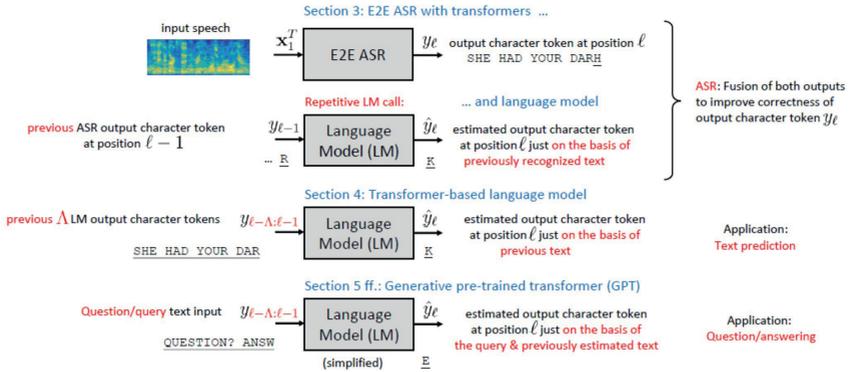


Figure 1: High-level view onto the article structure.

In Section 3, we give a high-level overview of end-to-end automatic speech recognition (E2E ASR). Such a DNN ASR engine reads in a sequence \mathbf{x}_i^T of mel spectra in x_i frames $t = 1, 2, \dots, T$. The output is a sequence of output character tokens, which might represent an actual character, or a word, or a word part (so-called byte-pair encoding, BPE). Note the different output token index $l = 1, 2, \dots, L$, as one or more input frames t may contribute to a single output token with index l . Furthermore, we introduce a language model, which is another DNN, reading in the previous token(s) y_{l-1} that has/have been generated by the ASR engine, and delivering at the output an estimate \hat{y}_l for the next token. Note that such a language model predicts new text only from old already recognized text, but without the use of the speech signal (as the ASR engine does). It can be advantageously used together with an E2E ASR engine, whereby fusion of the outputs of both networks needs to be performed. The result is then an improved output token, that forms correct words with higher probability.

In Section 4, we then look deeper into a transformer-based LM and realize that a longer input context of A previous tokens $y_{l-A:l-1}$ delivers much more reliable output of the language model.

In Section 5, we finally learn about the generative pre-trained transformer (GPT), which is the underlying large language model (LLM) of ChatGPT. Like any of the earlier language models, it delivers estimates of next tokens, but an LLM typically has a much larger input context A . Note at this point: Although we know ChatGPT primarily as a question/answering system, there are many other uses as well, such as text summarization, story writing, software coding, etc. *In fact, however, the underlying LLM is always only a text predictor, handling the query as “old” text, and delivering the continuation of this old text in a recurrent fashion.*

3 End-to-end Automatic Speech Recognition (E2E ASR)

In Figure 2, an end-to-end automatic speech recognizer according to the attention-based encoder-decoder paradigm is shown on high level [3, 4]. We identify the encoder input mel spectrogram sequence \mathbf{x}_1^T and the output token at current output decoding time step l . The role of the encoder is to transform the input sequence \mathbf{x}_1^T into a hidden representation sequence \mathbf{h}_1^T . Note that this is a *sequence-to-sequence* mapping of the form $\mathbf{x}_1^T \rightarrow \mathbf{h}_1^T$, not a mapping of only single time steps $x_t \rightarrow h_t$. The right-hand side of Figure 2 shows the attention decoder, which is called again and again, producing output (character) tokens y_l in an autoregressive manner. This means that – in our example – the old letter $y_{l-1} = "C"$ from time step $l-1=3$ is given as input to the decoder, and with using the entire hidden representation sequence \mathbf{h}_1^T as the input from the left side, the decoder outputs the next recognized letter $y_l = "K"$ at decoding time step $l=4$. We note that the decoder at each decision (the `argmax` function is used at its output to select the most probable token) relies on both the entire audio input, but also on the past already recognized tokens. It is again important to note that an encoder frame time step t does not one-to-one correspond to a certain decoder time step l . Instead, the attention decoder is called for recognizing the same input speech signal as often as necessary and until an end-of sentence token `<eos>` is delivered by the `argmax`.

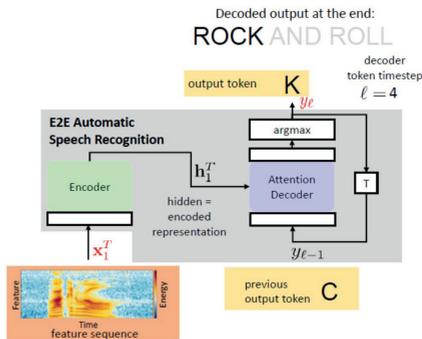


Figure 2: End-to-end ASR according to the attention-based encoder-decoder (AED) paradigm.

Now let's go one step more into detail. In Figure 3, some more details on the encoder and decoder blocks are shown. For the scope of this article, not all details are relevant, so the interested reader is referred to Viswani et al. [2]. What is of interest, however, is that both encoder and decoder are configured of a number of *blocks*: 12 encoder blocks (left), 6 decoder blocks (right). Both block types have similar structure, as they contain at their core a multi-head attention (MHA) module. Such a module has three inputs, namely a query Q , a key K , and a value V . Internally, temporal relations between sequences Q and K are exploited – similar to a correlation – and the result is multiplied to the value sequence V . In the case of an *encoder* block, a so-called *self*-attention is used, where we have $Q=K=V$. Such a module is also applied early in each decoder block, however, here, future decoder time steps must be masked out as they are not available in inference (i.e., in operation).

The core MHA module in the *decoder* is a *cross*-attention function, as we have $K=V= \mathbf{h}_1^T$ originating from the encoder, but the query Q stemming from the old token decoder input. So here, a kind of cross-correlation between the speech signal represented by $K= \mathbf{h}_1^T$ and a transformed representation Q of the old recognized tokens y_{l-1} is computed. The total number of input time frames is denoted as T , while B represents the batch size in training, and d is the dimension of an internal data representation.

No recurrency at all, **very deep models possible**

Encoder consists of encoder blocks using (linear) self-attention and (non-linear) fully connected layers with residual bypasses

Decoder in addition uses cross attention (also called: encoder-decoder attention)

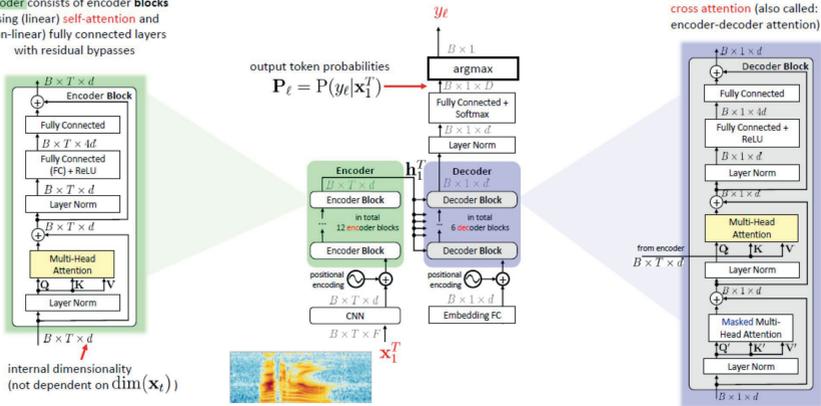


Figure 3: Details of the E2E ASR model according to the AED paradigm.

4 Transformer-Based Language Model

In Figure 4 (left), the ASR decoder with the cross-attention [2] is shown again. The hidden representation sequence from the encoder, here called $\mathbf{h}_{1:T}^{ENC}$ is key and value input into the ASR decoder. The output here is the probability vector \mathbf{P}_l^{ED} of the token, still before the final argmax decision. In Figure 4 (center), a transformer-based language model (LM) is depicted. It is topologically very similar, with the only *difference that the cross-attention MHA module along with its initial layer norm has been removed*, compare Figure 3 (right) and Figure 4 (right). The language model delivers a concurrent probability output \mathbf{P}_l^{LM} on the estimated output token.

An encoder-decoder ASR model can operate its encoder, connect it to its cross-attention-based decoder, and in parallel run a decoder-based LM [6], as both decoders read in already recognized past tokens y_{l-1} . But how to perform fusion on the outputs? That can be very effectively achieved by so-called shallow fusion [5] according to

$$\log \mathbf{P}_l = \log \mathbf{P}_l^{ED} + \lambda \log \mathbf{P}_l^{LM}$$

followed by a final argmax operation on P_i to obtain the estimated output token y_i . Using an extra separate language model, most ASR systems take significant profit. As an example, without LM, an AED model achieved on a certain task a word error rate of 26.2%, but with an LM this reduced to only 21.4% [19]. Although the technologies for an ASR decoder and an LM are so similar, there is such significant advantage of using the LM. This can be explained by the fact that ASR models must be trained on speech signal recordings along with their textual transcriptions (labels). *A language model, however, only needs texts as training data*, as the desired output is always only the next token (letter, word, or BPE). The diversity of these two different datasets along with the fact that text databases are typically much larger, make the interplay between ASR and LM so powerful.

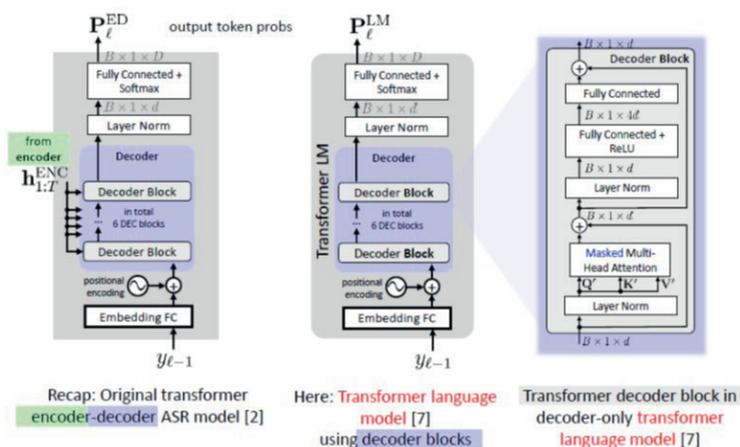


Figure 4: Left: ASR decoder with cross-attention, center: LM with self-attention, right: Details of an LM decoder block.

Another aspect, why transformer-based language models are so strong, is given by Liu et al., as the authors claim [7]: “... we introduce a decoder-only architecture that can scalably attend to very long sequences, much longer than typical encoder-decoder architectures used in sequence transduction.” We will come back on the immense scalability of a language model transformer in the next section.

5 Generative Pre-Trained Transformer (GPT) and ChatGPT

As mentioned before, there is a simple training strategy of (transformer-based) language models: Some text up to a certain decoder time step $l-1$ forms the query, while the rest of the text serves as cheap (since it is available) ground truth for

supervised learning. Accordingly, it is straightforward to pre-train large language models (LLMs) on a large text corpus, e.g., from the internet. The first in a series of the most prominent GPT LLMs, GPT-1, is simply constructed according to the well-known Figure 5 transformer decoder topology [8]. It features a context window of $\Lambda = 512$ previous tokens and a subword (i.e., BPE) vocabulary size of 40,000 tokens. The actual number of decoder blocks in GPT-1 is 12, resulting in 117M parameters in total. The pre-training was performed on the 7000 books BookCorpus [20] and took about a month on 8 GPUs, which is possible but lengthy and already approaches the limits of many universities labs' GPU infrastructure.

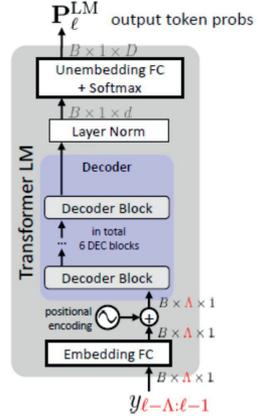


Figure 5: GPT-n network topology.

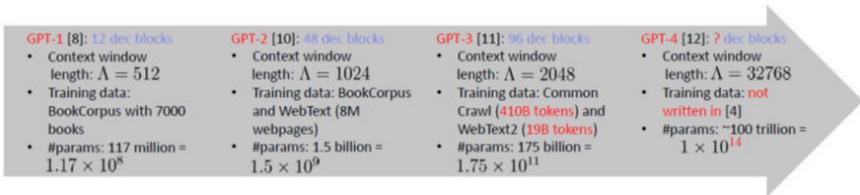


Figure 6: The generations of GPT.

In Figure 6, we see the various generations of the GPT large language model. The already described GPT-1 model [8] was mainly used for classification purposes [9]. To perform classification with a LLM, a fully connected (FC) network layer followed by a softmax activation function is simply appended to the LLM, and a fine-tuning (i.e., a further training) on text data for that specific task is performed. An example may be grammar and spelling checking, where the query (i.e., input) sentence ($\langle \text{sos} \rangle$ The gardener planted roses in the garden. $\langle \text{eos} \rangle$) yields a binary output of the FC layer, in this case “OK” (instead of “not OK”). Another example may be providing a text passage to the LLM (“passage”), then providing four different answer options (1) ... (4), and finally four times with the passage followed by one of the answers: The network output (i.e., the FC layer output) can be fine-tuned to deliver a probability each time. One could then simply decide for the maximum probability.

As Figure 6 shows, GPT-2 has four times the number of decoder blocks (48) as GPT-1, it has a doubled input context of $\Lambda = 1024$, and roughly ten times the size of GPT-1. Along with BookCorpus, it has seen 8M webpages from the WebText

corpus. GPT-2 is said to be a first truly generative model, as it can perform various tasks. To accomplish this, during generative pre-training, the technique of task conditioning has been used.

Neural machine translation task:

```
( < sos > Translate to French ; English text ; French text < eos > )
```

task
input
output

Reading comprehension task:

```
( < sos > Answer the question ; document ; question ; answer < eos > )
```

task
input
output

Figure 7: Two examples of task conditioning.

Two examples of such task conditioning are given in Figure 7. The first shows the format of training text sequences for a neural machine translation task. Note that the user of the LLM trained in this fashion only enters an example query (< sos > Translate to French; I am Tim.) and the LLM then delivers the *continuation* (; Je suis Tim. < eos >). Of course, this (mostly) also works for sentences unseen in training. The second task shown is a reading comprehension task. Also here, the query typically only consists of the text until the question, and the continuation is then the answer.

Back to Figure 6, for GPT-3, the number of decoder blocks and the input context doubles compared to GPT-2 (96 blocks, $A = 2048$), much more training data has been employed, and the model size is more than 100 times as large as GPT-2 [13]! A new technique called *in-context learning* is possible with GPT-3, making tasks even more flexible. While GPT-2 learned a certain number of tasks (see examples in Figure 7), GPT-3 can be given a (*new*) *task during inference time*.

During inference:

Zero-shot:

```
Translate English to French: ← task description
cheese => ← prompt
```

One-shot:

```
Translate English to French: ← task description
main => hand ← example
cheese => ← prompt
```

Few-shot:

```
Translate English to French: ← task description
main => hand ← examples
wine => vin ← examples
sun => soleil ← examples
cheese => ← prompt
```

Figure 8: In-context learning.

This works as shown in Figure 8. A new task is simply defined by a few examples in a certain format (see Figure 8 on the right). All this is part of the user query.

Stopping the query after (... cheese =>), GPT-3 again only continues the text by (ideally) outputting (fromage <eos>).

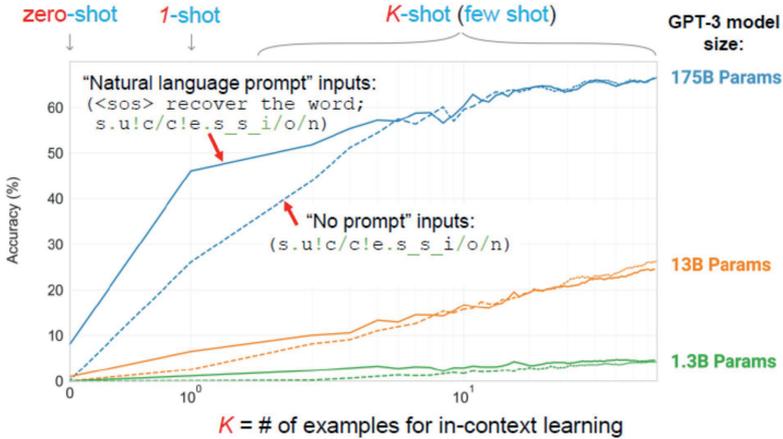


Figure 9: K -shot learning performance of GPT-3 (after [11]).

From Figure 8, it is easy to see that a zero- or one-shot task is more difficult than a few-shot task with $K=3$ or 10 . This has been further investigated by Brown et al. [11] with a “recover the word” task that simply cleans up a word in the query. In Figure 9 we see that with larger K , the accuracy of solving the task correctly rises. Even more importantly, we see that smaller models (green and orange) perform poorly, particularly for the zero- and one-shot case. The 175B sized GPT-3, however, is significantly stronger for all K , while the relative advantage versus smaller models is most prominent for zero-shot and one-shot. *This underpins the well-known scalability of transformer networks: The larger they get, the stronger they get.*

Along this line of strategy, and back to Figure 6, GPT-4 [12] comes with a 16-times larger input context as GPT-3, which is now $A = 32768$. GPT-4 is about 1000 times as large as GPT-3, and its training data is publicly not available. Both the size of this network and the unpublished training data raises serious questions on the reproducibility of this work. GPT-4 provides the option to feed it both with text and images at the input. As the report [12] on GPT-4 does not reveal all details, the interested reader is advised to read Huang et al. [14] who further explain and motivate the path of LLMs towards multi-modal input.

6 Concluding Remarks

After automatic speech recognition by SIRI, Amazon Echo, and Google Home in the 2010's, large language models – as being part of ChatGPT – have revolutionized speech technology once again in 2023. This article introduces on a high level the deep neural network (DNN) type of an attention-based encoder-decoder (AED) structure of a transformer end-to-end automatic speech recognizer (ASR). We show the similarity of the ASR decoder to a standalone transformer-based language model (LM). Such LM is not only able to support an ASR engine to achieve higher accuracy, but it also can be used standalone as text predictor that is being called in an autoregressive manner (loop). We have shown that the generative pre-trained transformers of version n (GPT-n) underlying ChatGPT are only upscaled versions of a basic transformer decoder structure: They use an increasing input context, an increasing number of decoder blocks and an increasing amount of (text) training data. We have presented the core additional capabilities of each new GPT-n release, mostly related to the ability of performing additional tasks. We have seen that the performance of GPT-3 on either unseen (zero shot) or only once seen (single shot) tasks drastically improves the larger the DNN model gets. This scalability of transformer networks can let us assume that this technique will be of relevance for the next years, as with an increasing number of computations on hardware platforms also the performance of the DNN model will rise and will not ask for a technology change in a higher computational effort regime.

The article entirely took a technical perspective, therefore only briefly touching ethical and further aspects of such language technology. These further aspects, however, are important to be discussed, as the long-term acceptance of language technology such as ChatGPT in various fields of society depends on a common view of its usefulness.

References

- [1] E. Jones, T. Oliphant, P. Peterson et al., “Was ist ChatGPT und warum ist es für Ihr Unternehmen wichtig?” Feb. 2023, [Online; accessed April 5th]. Available: <https://www.klippa.com/de/blog/informativ/was-ist-chatgpt/>
- [2] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin, “Attention Is All You Need,” in Proc. of NIPS, Long Beach, CA, USA, Dec. 2017, pp. 1–11.
- [3] W. Chan, N. Jaitly, Q. Le, and O. Vinyals, “Listen, Attend and Spell: A Neural Network for Large Vocabulary Conversational Speech Recognition,” in Proc. of ICASSP, Shanghai, China, Mar. 2016, pp. 4960–4964.
- [4] L. Dong, S. Xu, and B. Xu, “Speech-Transformer: A No-Recurrence Sequence-to-Sequence Model for Speech Recognition,” in Proc. of ICASSP, Calgary, AB, Canada, Apr. 2018, pp. 5884–5888.

- [5] C. Gülcehre, O. Firat, K. Xu, K. Cho, L. Barrault, H. Lin, F. Bougares, H. Schwenk, and Y. Bengio, “On Using Monolingual Corpora in Neural Machine Translation,” arXiv:1503.03535, Mar. 2015.
- [6] E. McDermott, H. Sak, and E. Variani, “A Density Ratio Approach to Language Model Fusion in End-to-End Automatic Speech Recognition,” in Proc. of ASRU, Singapore, Singapore, Dec. 2019, pp. 434–441.
- [7] P. J. Liu, M. Saleh, E. Pot, B. Goodrich, R. Sepassi, L. Kaiser, and N. Shazeer, “Generating Wikipedia by Summarizing Long Sequences,” in Proc. of ICLR, Vancouver, BC, Canada, Apr. 2018, pp. 1–18.
- [8] A. Radford, K. Narasimhan, T. Salimans, I. Sutskever et al., “Improving Language Understanding by Generative Pre-Training,” Jun. 2018.
- [9] G. Lai, Q. Xie, H. Liu, Y. Yang, and E. Hovy, “RACE: Large-scale Reading Comprehension Dataset from Examinations,” in Proc. of EMNLP, Copenhagen, Denmark, Sep. 2017, pp. 785–794.
- [10] A. Radford, J. Wu, R. Child, D. Luan, D. Amodei, I. Sutskever et al., “Language Models Are Unsupervised Multitask Learners,” OpenAI Blog, vol. 1, no. 8, pp. 1–24, 2019.
- [11] T. Brown, B. Mann, N. Ryder, M. Subbiah, J. D. Kaplan, P. Dhariwal, A. Neelakantan, P. Shyam, G. Sastry, A. Askell, S. Agarwal, A. Herbert-Voss, G. Krueger, T. Henighan, R. Child, A. Ramesh, D. Ziegler, J. Wu, C. Winter, C. Hesse, M. Chen, E. Sigler, M. Litwin, S. Gray, B. Chess, J. Clark, C. Berner, S. McCandlish, A. Radford, I. Sutskever, and D. Amodei, “Language Models Are Few-Shot Learners,” in Proc. of NeurIPS, vol. 33, virtual, Dec. 2020, pp.1877–1901.
- [12] J. Achiam, S. Adler, S. Agarwal, L. Ahmad, I. Akkaya, F. L. Aleman, D. Almeida, J. Altenschmidt, S. Altman, S. Anadkat et al., “GPT-4 Technical Report,” arXiv:2303.08774, Mar. 2023.
- [13] C. Raffel, N. Shazeer, A. Roberts, K. Lee, S. Narang, M. Matena, Y. Zhou, W. Li, and P. J. Liu, “Exploring the Limits of Transfer Learning with A Unified Text-to-Text Transformer,” *Journal of Machine Learning Research*, vol. 21, no. 140, pp. 1–67, Jan. 2020.
- [14] S. Huang, L. Dong, W. Wang, Y. Hao, S. Singhal, S. Ma, T. Lv, L. Cui, O. K. Mohammed, B. Patra, Q. Liu, K. Aggarwal, Z. Chi, J. Bjorck, V. Chaudhary, S. Som, X. Song, and F. Wei, “Language Is Not All You Need: Aligning Perception with Language Models,” in Proc. of NIPS, New Orleans, LA, USA, Dec. 2023, pp. 72 096–72 109.
- [15] L. Ouyang, J. Wu, X. Jiang, D. Almeida, C. Wainwright, P. Mishkin, C. Zhang, S. Agarwal, K. Slama, A. Ray, J. Schulman, J. Hilton, F. Kelton, L. Miller, M. Simens, A. Askell, P. Welinder, P. F. Christiano, J. Leike, and R. Lowe, “Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback,” in Proc. of NIPS, New Orleans, LA, USA, Nov. 2022, pp. 27 730–27 744.
- [16] J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, “Proximal Policy Optimization Algorithms,” arXiv:1707.06347, Jul. 2017.

- [17] J. Zhou, H. Müller, A. Holzinger, and F. Chen, “Ethical ChatGPT: Concerns, Challenges, and Commandments,” arXiv:2305.10646, May 2023.
- [18] S. Mukherjee, A. Mitra, G. Jawahar, S. Agarwal, H. Palangi, and A. Awadallah, “Orca: Progressive Learning from Complex Explanation Traces of GPT-4,” arXiv:2306.02707, Jun. 2023.
- [19] G. Saon, Z. Tüske, D. Bolanos, and B. Kingsbury, “Advancing RNN Transducer Technology for Speech Recognition,” in Proc. of ICASSP, Toronto, ON, Canada, Jun. 2021, pp. 5654–5658.
- [20] Y. Zhu, R. Kiros, R. Zemel, R. Salakhutdinov, R. Urtasun, A. Torralba, and S. Fidler, “Aligning Books and Movies: Towards Story-Like Visual Explanations by Watching Movies and Reading Books,” in Proc. of ICCV, Santiago, Chile, Dec. 2015, pp. 19–27.

Wissenschaftskommunikation im Zeitalter künstlicher Intelligenz

ESTHER GREUSSING

Technische Universität Braunschweig
Institut für Kommunikationswissenschaft
Bienroder Weg 97, 38106 Braunschweig

Wissenschaftliches Wissen nimmt in modernen Gesellschaften eine zentrale Rolle für die persönliche Meinungsbildung und Entscheidungsfindung ein. Das Aufkommen generativer Künstlicher Intelligenz (in der Folge kurz ‚KI‘) ändert womöglich die Art und Weise, wie Bürger:innen sich mit wissenschaftlichen Inhalten auseinandersetzen, grundlegend. Obwohl KI-Modelle keine Inhalte auf semantischer Ebene generieren können, ermöglichen ihre Analysen von Sprachstrukturen und -mustern die Berechnung und Ausgabe von Texten in natürlicher Sprache. Für die Nutzer:innen bedeutet dies, dass sie intuitiv mit der KI kommunizieren und in Sekundenschnelle Antworten auf komplexe Fragen erhalten.

Gegenwärtig gilt OpenAIs großes Sprachmodell GPT, insbesondere dessen Implementierung im Chatbot ChatGPT, als das bekannteste und meistgenutzte KI-Modell, gefolgt von Google Gemini und Microsoft Copilot. ChatGPT stößt insbesondere bei jüngeren Menschen auf Interesse (Fletcher und Nielsen 2024). Auch wenn die Gruppe der regelmäßigen Nutzer:innen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch eine kleine ist, stellt die Suche nach wissenschaftlichen Informationen eine bedeutende Anwendung dar. Eine im Jahr 2023 in sieben Ländern durchgeführte Umfrage ergab, dass durchschnittlich 9% der Befragten ChatGPT speziell für diesen Zweck nutzen, insbesondere in Taiwan, Südkorea, den USA und Israel (Greussing u. a. 2024). KI-basierte Chatbots wie ChatGPT können sich aus Perspektive der allgemeinen Bevölkerung als geeignet für die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Inhalten erweisen (Wissenschaft im Dialog 2023), obwohl sie nicht primär als Rechercheinstrument konzipiert wurden: Es besteht die Möglichkeit, in einen Dialog zu treten, Rückfragen zu stellen oder sich komplexe Sachverhalte in einfacher Sprache und anhand von Beispielen erklären zu lassen (Schäfer 2023). In experimentellen Studien konnte wiederholt nachgewiesen werden, dass die Verwendung von Fachjargon in der an die Öffentlichkeit gerichteten Kommunikation exkludierend wirkt und das Verständnis wissenschaftlicher Inhalte einschränkt (Bullock u. a. 2019). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die erlebte Leichtigkeit der Informationsverarbeitung verringert wird (Shulman u. a. 2020). KI-basierte Chatbots könnten dieser Barriere entgegenwirken, indem sie wissenschaftliches Wissen in einer alltagsnahen Weise vermitteln, was zugleich den Erwartungen an die Kommunikation von (wissenschaftlichen) Ex-

pert:innen entspricht (Wicke und Taddicken 2020). Ist generative KI also tatsächlich ein „Gamechanger“ (Wingens 2023) für die Beziehung zwischen Wissenschaft und Gesellschaft?

1 Generative KI als neuer Informationsintermediär

Dem Prinzip des „Public Engagement with Science“ entsprechend soll sich Wissenschaftskommunikation an den Kompetenzen, Bedürfnissen und Kommunikationspraktiken ihres jeweiligen Publikums orientieren (Leshner 2003). Dies trifft insbesondere auf wenig wissenschaftsaffine und schwer erreichbare Bevölkerungsgruppen zu. Für sie könnten KI-basierte Chatbots einen niedrigschwelligen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen bieten, der sich an individuelle Bedürfnisse anpassen lässt (Schäfer 2023). Möglicherweise wirkt sich dies positiv auf eine stärkere Beteiligung an gesellschaftlichen Diskursen zu Wissenschaft aus. Klar ist aber auch, dass generative KI weder objektiv noch neutral ist. Sie unterliegt bestimmten Normen und Werten, die in ihre materielle Struktur eingebettet sind (Gillespie 2016). Eine Offenlegung der zugrundeliegenden Trainingsdaten und -prozesse steht im Widerspruch zu den Geschäftsmodellen großer Technologiekonzerne. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass sie bestimmte Sprachen, Perspektiven und soziokulturelle Kontexte überrepräsentieren (Biyela u. a. 2023).

Vor diesem Hintergrund haben sich Kommunikationswissenschaftler:innen der Universität Zürich der „Reverse Engineering Technique“ bedient, um die durch ChatGPT vermittelten Vorstellungen von Wissenschaft zu analysieren. Dazu wurden verschiedene Nutzer:innenprofile erstellt, die sich in ihrer Einstellung zu Wissenschaft von ‚stark vertrauend‘ bis ‚kritisch‘ bzw. ‚ablehnend‘ unterscheiden (Volk u. a. 2023). Unabhängig vom Nutzer:innenprofil weisen die Antworten von ChatGPT insgesamt eine hohe Ähnlichkeit auf und beinhalten in der Regel allgemeine, korrekte Beschreibungen des wissenschaftlichen Kenntnisstandes zu Themen wie Klimawandel und Impfungen. Des Weiteren wird eine positive Haltung gegenüber der Wissenschaft und ihrer Relevanz in modernen Gesellschaften vermittelt. Deutliche Unterschiede zeigen sich demgegenüber in der Gestaltung der Antworten, was dazu führen kann, dass sich vorherrschende, insbesondere kritische Einstellungen zur Wissenschaft bei bestimmten Nutzer:innen festigen oder gar verstärken (Chen u. a. 2022).

Um potenzielle Ungleichheiten zwischen verschiedenen Nutzer:innengruppen zu identifizieren und zu verhindern, dass die Kommunikation über Wissenschaft selbst zu diesen Ungleichheiten beiträgt (Metag 2017), erfordern derartige Verzerrungen eine verstärkte wissenschaftliche Aufmerksamkeit. Dies betrifft auch die Qualität der KI-generierten Inhalte.

2 Wahrnehmung von KI-generierten Inhalten

Große Sprachmodelle generieren Inhalte auf Basis von Mustern und Wahrscheinlichkeiten, ohne jegliches Verständnis für ihre Bedeutung. Es ist daher zu befürchten, dass sie Inhalte präsentieren, die nicht dem aktuellen Forschungsstand entsprechen oder schlichtweg falsch sind – insbesondere bei sogenannten „socio-scientific issues“, die von hoher gesellschaftlicher Relevanz sind, deren zugrundeliegendes wissenschaftliches Wissen aber durch Unsicherheit, Vorläufigkeit und Komplexität gekennzeichnet ist (Biyela u. a. 2023; Schäfer 2023).

Die Forschung zur Nutzung von browserbasierten Suchmaschinen zeigt außerdem, dass Menschen typischerweise auf Metainformationen wie die Reihung, den Titel oder die Herkunft eines Suchergebnisses zurückgreifen (Unkel und Haas 2017). Diese peripheren Hinweise lenken die Aufmerksamkeit und dienen der Bewertung der Glaubwürdigkeit der präsentierten Inhalte (Sundar 2008). Systeme wie ChatGPT bieten derartige Hinweise jedoch nicht. Sie generieren für nahezu jede Frage eine umfassende Antwort. Folglich obliegt es den Nutzer:innen, zu beurteilen, ob die Antwort der KI ihren Erwartungen an Genauigkeit, Relevanz oder Vollständigkeit entspricht, oder ob eine (umformulierte) Folgefrage erforderlich ist. Dies läuft aktuellen Bemühungen der Wissenschaftskommunikationspraxis entgegen, mit der inhärenten Komplexität und Unsicherheit wissenschaftlichen Wissens auf offene und transparente Weise umzugehen (Jamieson 2017).

Die Fähigkeit, schnell Plausibilitätsurteile über Informationen zu fällen, stellt eine Schlüsselkompetenz in der heutigen Informationsumgebung dar (Sinatra und Lombardi 2020). Erste Befunde legen nahe, dass es für Menschen eine beträchtliche Herausforderung darstellt, KI-generierte Inhalte als solche zu erkennen (z. B. Wölker und Powell 2021). Sobald Menschen mit der mangelnden Unterscheidungsfähigkeit konfrontiert werden, sinkt ihr Vertrauen in ihre diesbezüglichen Fähigkeiten zusätzlich (Spitale u. a. 2023). Dazu trägt auch bei, dass GPT-Modelle aufgrund der leicht verständlichen Texte eine hohe Überzeugungskraft aufweisen, sodass Falschinformationen schwerer als solche erkannt werden (Spitale u. a. 2023).

Diesen Einschränkungen generativer KI sind sich Menschen durchaus bewusst (Skjuve u. a. 2023). Das Wissenschaftsbarometer 2023 zeigt, dass 44 % der deutschen Bevölkerung KI-Systemen bei der Wiedergabe wissenschaftlicher Inhalte eher nicht oder gar nicht vertrauen (Wissenschaft im Dialog 2023). Gestützt wird dieser Befund durch qualitative Untersuchungen in Deutschland: Nach der Interaktion mit ChatGPT und Microsoft Copilot in Bing betonten Studienteilnehmer:innen, dass sie die KI-generierten Antworten als hilfreichen Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Inhalten betrachteten. Für ein fundiertes Verständnis eines Themas wollten sie jedoch weiterhin auf traditionelle

Informationsquellen zurückgreifen, da sie die Faktizität der KI-generierten Inhalte nicht überprüfen können (Greussing, Jonas, und Taddicken 2023).

3 Wahrnehmung von generativer KI als Informationsquelle

Wie gut Menschen über Wissenschaft informiert sind, hängt nicht nur von der Qualität der Informationen ab, denen sie begegnen. Von Bedeutung ist auch, wie sie diese Informationen verarbeiten und bewerten. Der Forschungstradition der sozialen Kognition (Chaiken 1980) folgend, wird angenommen, dass Individuen Inhalte auf Grundlage kognitiver Heuristiken bewerten (Sundar 2008). In diesem Sinne können KI-Systeme eine sogenannte „Maschinenheuristik“ hervorrufen, sprich zur allgemeinen Annahme führen, dass Maschinen regelgeleitet und daher objektiv und neutral agieren (Sundar und Kim 2019). Eine aktuelle experimentelle Studie widerspricht dieser Annahme jedoch: Ein menschlicher Wissenschaftler, der Fragen zu Nanopartikeln in Sonnenschutzmitteln beantwortet, wurde als objektiver und dadurch vertrauenswürdiger bewertet als ein KI-Chatbot (Hendriks u. a. 2023). In diesem Kontext wurde dem Chatbot möglicherweise die im menschlichen Urteilsvermögen angelegte Flexibilität abgesprochen, die insbesondere bei Aufgaben, die Interpretation, Erklärung und Bewertung von Informationen umfassen, von Relevanz ist (Molina und Sundar 2024).

Vertrauen in die Informationsquelle wird als Voraussetzung und Ergebnis einer erfolgreichen Wissenschaftskommunikation begriffen (Hendriks u. a. 2015). Vertrauenswürdige Expert:innen sollen nicht nur akkurate Fakten präsentieren, sondern auch emotionale Reaktionen hervorrufen, die eine Verbindung zum Publikum herstellen (Reif u. a. 2020), sowohl Kompetenz als auch Wärme repräsentieren (Fiske und Dupree 2014). In Bezug auf generative KI bedeutet dies: Die Wahrnehmung der Technologie als objektive und unvoreingenommene Maschine kann ebenso wichtig sein wie ihre Wahrnehmung als ein dem Menschen ähnlicher sozialer Akteur.

Durch die Simulation des unstrukturierten Flusses menschlicher Kommunikation und die dadurch ermöglichte sinnvolle Anschlusskommunikation fungiert generative KI nicht nur als Kanal, der Nachrichten übermittelt. Sie wird vielmehr selbst zum Kommunikator (Guzman und Lewis 2010). Die Gestaltung der Konversationschnittstelle in Anlehnung an menschliche Interaktionsmuster führt dazu, dass Nutzer:innen der Technologie soziale Verhaltensweisen zuschreiben und sie anthropomorphisieren (Gambino u. a. 2020; Nass und Moon 2000). KI-basierte Technologien werden so zu „personalisierten Dingen“, die zwar menschliche Eigenschaften aufweisen, gleichzeitig aber in der Welt der Dinge verankert bleiben (Etzrodt und Engesser 2021).

Die Tatsache, dass KI-basierte Technologien sowohl als Kanäle als auch als Kommunikatoren konzipiert und interpretiert werden, stellt die Wissenschaftskommunikationsforschung vor die Aufgabe, etablierte theoretische Konzepte, die bisher ausschließlich auf die Kommunikation zwischen Menschen ausgerichtet sind, schärfer zu konturieren. Im Hinblick auf Vertrauen muss beispielsweise der hybride ontologische Status generativer KI berücksichtigt werden, um besser zu verstehen, wie die Ontologie der Quelle in Kombination mit der Komplexität und Unsicherheit wissenschaftlicher Inhalte die kognitive Auseinandersetzung von Lai:innen mit einer Botschaft beeinflusst (Jonas, Greussing, und Taddicken 2023).

4 Generative KI als epistemischer Akteur?

An die Wahrnehmung von generativer KI als Quelle wissenschaftlicher Informationen schließen sich neue epistemologische Fragen an: Kann ein großes Sprachmodell ein eigenständiger epistemischer Akteur, gar eine epistemische Autorität sein? Aus technischer Perspektive sind Menschen einer KI gegenüber im Nachteil. Denn obgleich KI-Modelle keine Bedeutung in die von ihnen generierten Inhalte legen können, übertreffen sie die menschliche Kognition in Bezug auf Geschwindigkeit und Leistung (Walmsley 2021). KI ist zudem in Erzählungen über eine „superintelligente denkende Maschine“ eingebettet, die seit den 1950er-Jahren in der Popkultur sowie der Medienberichterstattung verbreitet wird (Natale und Ballatore 2020). Hier ist auf die Beobachtung von Natale (2020) zu verweisen, der zu bedenken gibt, dass das Branding von Sprachassistenten an diese Vorstellung anschließt, indem sie als allwissende Wesen charakterisiert werden, die auf alles eine Antwort haben, egal um welches Thema es sich handelt. Als Konsequenz dessen könnten KI-Systeme, welche allgegenwärtiges und automatisiertes Wissen repräsentieren, das lediglich abgerufen werden muss, das Konzept von (wissenschaftlicher) Expertise infrage stellen (Coleman 2021) und in Konkurrenz zu menschlichen Expert:innen treten. Aufgrund ihrer hohen Komplexität sind KI-Modelle für den Menschen allerdings nicht vollständig nachvollziehbar. Es fehlt ihnen die Fähigkeit, Erklärungen für ihre Schlussfolgerungen bereitzustellen, obwohl von epistemischen Autoritäten eine solche Erklärungsleistung erwartet wird (Walmsley 2020). Die fehlende Fähigkeit zur epistemischen Selbstreflexion führt aus theoretischer Perspektive zu einer Schwächung des Status generativer KI als epistemische Autorität (Ferrario u. a. 2024).

Der vorliegende Beitrag fokussierte bislang auf die Nutzung und Wahrnehmung generativer KI als Informationsintermediär, welcher die *Kommunikation* über wissenschaftliche Inhalte generiert und verbreitet. Doch generative KI ist nicht nur ein neuer Akteur in der individuellen Informationsumgebung. Sie hat das Potential, die *Produktion* wissenschaftlichen Wissens zu verändern (Fecher u. a. 2023). Algorithmen sind in der Lage, enorme Datenmengen zu analysieren und kom-

plexe Simulationen und Modellierungen durchzuführen. Dadurch eröffnen sich neue Möglichkeiten für die Analyse wissenschaftlicher Fragestellungen und die Entdeckung bislang unbekannter Zusammenhänge. Aus sozialepistemologischer Perspektive wird KI damit in das System epistemischer Arbeitsteilung integriert (Hauswald 2021), was wiederum die Wissensordnung einer Gesellschaft weiter transformiert (Neuberger u. a. 2022).

Für die Wissenschaftskommunikation bedeutet dies, mit einem sich wandelnden Gegenstand konfrontiert zu sein. Angesichts dessen stellt sich die Frage, auf welche Art und Weise wissenschaftliches Wissen, das durch und mit KI entsteht, in die Öffentlichkeit vermittelt und im Austausch mit der Gesellschaft reflektiert werden kann. Dies betrifft insbesondere das Verständnis der Methoden und Prozesse sowie des Charakters wissenschaftlicher Erkenntnisse („nature of science“), einschließlich der Vorläufigkeit, Unvollständigkeit und Widersprüchlichkeit von Resultaten (Nisbet u. a. 2002).

5 Fazit

Wissen bildet die Grundlage moderner Gesellschaften und prägt die Meinungen, Entscheidungen und Handlungen sowohl einzelner Bürger:innen als auch politischer, wirtschaftlicher oder anderer gesellschaftlicher Institutionen (Weingart 2005). Angesichts ihrer raschen globalen Verbreitung erweitern KI-Modelle wie ChatGPT zunehmend das Informationsumfeld und werden zu einer zusätzlichen Quelle für wissenschaftsbezogene Inhalte.

Die Wissenschaftskommunikationsforschung zeigt, dass generative KI die individuelle Auseinandersetzung mit wissenschaftlichem Wissen möglicherweise nachhaltig verändert. Das Potenzial der neuen Technologie wird gegenwärtig allerdings durch Einschränkungen in der Qualität der generierten Inhalte geschmälert. Außerdem fungieren KI-Technologien in Zukunft möglicherweise nicht mehr nur als Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Sie könnten auch neue Vorstellungen von wissenschaftlichem Wissen und Expertise in einem hochpersonalisierten Kommunikationskontext etablieren. Um die genannten Veränderungen nicht nur retrospektiv zu erforschen, sondern in ihrer Entstehung analytisch zu begleiten, ist eine vorwärts gerichtete Reflexion und Forschung erforderlich, insbesondere in den Sozialwissenschaften.

Referenzen

Biyela, Sibusiso, Kanta Dihal, Katy I. Gero, Daphne Ippolito, Filippo Menczer, Mike S. Schäfer, und Hiromi M. Yokoyama. 2024. “Generative AI and science communication in the physical sciences.” *Nature Reviews Physics* (6)

3: 162–165.

- Bullock, Olivia M., Daniel Colón Amill, Hillary C. Shulman, und Graham N. Dixon. 2019. “Jargon as a barrier to effective science communication: Evidence from metacognition.” *Public Understanding of Science* 28 (7): 845–853.
- Chaiken, Shelly. 1980. “Heuristic versus systematic information processing and the use of source versus message cues in persuasion.” *Journal of Personality and Social Psychology* 39 (5): 752.
- Chen, Kaiping, Anqi Shao, Jirayu Burapachee, und Yixuan Li. 2022. “How GPT-3 responds to different publics on climate change and Black Lives Matter: A critical appraisal of equity in conversational AI.” Preprint. <https://arxiv.org/abs/2209.13627>.
- Coleman, Miles C. 2021. “Leveraging the rhetorical energies of machines: COVID-19, misinformation, and persuasive labor.” *Human-Machine Communication* 3: 11–26.
- Etzrodt, Katrin, und Sven Engesser. 2021. “Voice-based agents as personified things: Assimilation and accommodation as equilibration of doubt.” *Human-Machine Communication* 2: 57–76.
- Fecher, Benedikt, Marcel Hebing, Melissa Laufer, Jörg Pohle, und Fabian Sofsky. 2023. “Friend or foe? Exploring the implications of large language models on the science system.” *AI & Society*: 1–13.
- Ferrario, Andrea, Alessandro Facchini, und Alberto Termine. 2024. “Experts or authorities? The strange case of the presumed epistemic superiority of artificial intelligence systems.” *Minds and Machines* 34 (3): 1–27.
- Fiske, Susan T., und Cydney Dupree. 2014. “Gaining trust as well as respect in communicating to motivated audiences about science topics.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (supplement_4): 13593–13597.
- Fletcher, Richard, und Rasmus Kleis Nielsen. 2024. “What does the public in six countries think of generative AI in news?”. *Reuters Institute for the Study of Journalism*. DOI: 10.60625/risk-4zb8-cg87
- Gambino, Andrew, Jesse Fox, und Rabindra A. Ratan. 2020. “Building a stronger CASA: Extending the computers are social actors paradigm.” *Human-Machine Communication* 1: 71–85.
- Gillespie, Tarleton. 2016. “Algorithm.” In *Digital Keywords: A Vocabulary of Information Society and Culture*, herausgegeben von Benjamin Peters, 18–30. Princeton University Press.
- Greussing, Esther, Lars Guenther, Ayelet Baram-Tsabari, Shakked Dabran-Zivan, Evelyn Jonas, Inbal Klein-Avraham, Monika Taddicken, Torben Agergaard, Becca Beets, Dominique Brossard, Anwasha Chakraborty, Antoinette Fage-Butler, Chun-Ju Huang, Kristian Hvidtfelt Nielsen, Siddharth Kankaria, Yin-Yueh Lo, Michelle Riedlinger, und Hyunjin Song. 2024. “Mapping cross-national patterns: The use of generative AI in science-related information retrieval across seven countries”. Vortrag auf der Jahrestagung der Fachgruppe “Wissenschaftskommunikation” der Deutschen Gesellschaft für Publizistik- und Kommunikationswissenschaft (DGPK), Zürich, Schweiz.

- Greussing, Esther, Evelyn Jonas, und Monika Taddicken. 2024. "The Impact of Transparency: A Qualitative Investigation of LLM-based Chatbots in Science-Related Information Search". Vortrag auf der Jahrestagung der Fachgruppe "Wissenschaftskommunikation" der Deutschen Gesellschaft für Publizistik- und Kommunikationswissenschaft (DGPK), Zürich, Schweiz.
- Guzman, Andrea L., und Seth C. Lewis. 2020. "Artificial intelligence and communication: A human-machine communication research agenda." *New Media & Society* 22 (1): 70–86.
- Hauswald, Rico. 2021. "Digitale Orakel? Wie künstliche Intelligenz unser System epistemischer Arbeitsteilung verändert." In *Künstliche Intelligenz—Die große Verheißung*, herausgegeben von Anna Strasser, Wolfgang Sohst, Ralf Stapelfeldt, und Katja Stepec, 359–378. xenomoi Verlag.
- Hendriks, Friederike, Esther Greussing, Aike Horstmann, Bianca Nowak, Yannic Meier, und Rainer Bromme. 2024. "AI talking science: Two experimental studies on the perception of large language models as a source of scientific information". Vortrag auf der Jahrestagung der Fachgruppe "Wissenschaftskommunikation" der Deutschen Gesellschaft für Publizistik- und Kommunikationswissenschaft (DGPK), Zürich, Schweiz.
- Hendriks, Friederike, Dorothe Kienhues, und Rainer Bromme. 2015. "Measuring laypeople's trust in experts in a digital age: The Muenster Epistemic Trustworthiness Inventory (METI)." *PloS one* 10 (10): e0139309.
- Jamieson, Kathleen Hall. 2017. "The need for a science of science communication: Communicating science's values and norms." In *The Oxford Handbook of the Science of Science Communication*, herausgegeben von Kathleen Hall Jamieson, Dan M. Kahan, und Dietram A. Scheufele, 15–24. Oxford University Press.
- Jonas, Evelyn, Esther Greussing, und Monika Taddicken. 2024. "How do laypeople assess their trust in LLM-based chatbots when they seek science-related information? Results from a qualitative interview study using a hybrid trust approach." Vortrag auf der Jahrestagung der Fachgruppe "Wissenschaftskommunikation" der Deutschen Gesellschaft für Publizistik- und Kommunikationswissenschaft (DGPK), Zürich, Schweiz.
- Leshner, Alan I. 2003. "Public engagement with science." *Science* 299 (5609): 977–977.
- Metag, Julia. 2017. "Rezeption und Wirkung öffentlicher Wissenschaftskommunikation." In *Forschungsfeld Wissenschaftskommunikation*, herausgegeben von Heinz Bonfadelli, Birte Fähnrich, Corinna Lüthje, Jutta Milde, Markus Rhomberg, und Mike. S. Schäfer, 251–274. Springer Fachmedien.
- Molina, Maria D., und S. Shyam Sundar. 2024. "Does distrust in humans predict greater trust in AI? Role of individual differences in user responses to content moderation." *New Media & Society* 26 (6): 3638–3656.
- Nass, Clifford, und Youngme Moon. 2000. "Machines and mindlessness: Social responses to computers." *Journal of Social Issues* 56 (1): 81–103.

- Natale, Simone. 2020. "To believe in Siri: A critical analysis of AI voice assistants." https://iris.unito.it/bitstream/2318/1769694/1/CoFi_EWP_No-32_Simone-Natale.pdf
- Natale, Simone, und Andrea Ballatore. 2020. "Imagining the thinking machine: Technological myths and the rise of artificial intelligence." *Convergence* 26 (1): 3–18.
- Neuberger, Christoph, Anne Bartsch, Carsten Reinemann, Romy Fröhlich, Thomas Hanitzsch, und Johanna Schindler. 2019. „Der digitale Wandel der Wissensordnung. Theorierahmen für die Analyse von Wahrheit, Wissen und Rationalität in der öffentlichen Kommunikation.“ *M&K Medien & Kommunikationswissenschaft* 67 (2): 167–186.
- Nisbet, Matthew C., Dietram A. Scheufele, James Shanahan, Patricia Moy, Dominique Brossard, und Bruce V. Lewenstein. 2002. "Knowledge, reservations, or promise? A media effects model for public perceptions of science and technology." *Communication Research* 29 (5): 584–608.
- Reif, Anne, Tim Kneisel, Markus Schäfer, und Monika Taddicken. 2020. "Why are scientific experts perceived as trustworthy? Emotional assessment within TV and YouTube videos." *Media and Communication* 8 (1): 191–205.
- Schäfer, Mike S. 2023. "The Notorious GPT: science communication in the age of artificial intelligence." *Journal of Science Communication* 22 (2): 1–15.
- Shulman, Hillary C., Graham N. Dixon, Olivia M. Bullock, und Daniel Colón Amill. 2020. "The effects of jargon on processing fluency, self-perceptions, and scientific engagement." *Journal of Language and Social Psychology* 39 (5–6): 579–597.
- Sinatra, Gale M., und Doug Lombardi. 2020. "Evaluating sources of scientific evidence and claims in the post-truth era may require reappraising plausibility judgments." *Educational Psychologist* 55 (3): 120–131.
- Skjuve, Marita, Asbjørn Følstad, und Petter Bae Brandtzaeg. 2023. "The user experience of ChatGPT: findings from a questionnaire study of early users." *Proceedings of the 5th International Conference on Conversational User Interfaces*. ACM.
- Spitale, Giovanni, Nikola Biller-Andorno, und Federico Germani. 2023. "AI model GPT-3 (dis) informs us better than humans." *Science Advances* 9 (26): eadh1850.
- Sundar, S. Shyam. 2008. "The MAIN Model: A Heuristic Approach to Understanding Technology Effects on Credibility." In *Digital Media, Youth, and Credibility*, herausgegeben von Miriam J. Metzger und Andrew J. Flanagin, 73–100. The MIT Press.
- Sundar, S. Shyam, und Jinyoung Kim. 2019. "Machine heuristic: When we trust computers more than humans with our personal information." *Proceedings of the 2019 CHI Conference on human factors in computing systems*. ACM.
- Unkel, Julian, und Alexander Haas. 2017. "The effects of credibility cues on the selection of search engine results." *Journal of the Association for Information Science and Technology* 68 (8): 1850–1862.

- Volk, Sophia C., Mike S. Schäfer, Damiano Lombardi, Daniela Mahl, und Xiaoyue Yan. 2024. "How Generative AI Portrays Science. Interviewing ChatGPT from the Perspective of Different Audience Segments." Preprint. <https://osf.io/preprints/osf/erf36>
- Walmsley, Joel. 2021. "Artificial intelligence and the value of transparency." *AI & Society* 36 (2): 585–595.
- Weingart, Peter. 2005. *Die Wissenschaft der Öffentlichkeit. Essays zum Verhältnis von Wissenschaft, Medien und Öffentlichkeit*. Velbrück.
- Wicke, Nina, und Monika Taddicken. 2020. "Listen to the audience(s)! Expectations and characteristics of expert debate attendants." *Journal of Science Communication* 19 (4): A02.
- Wingens, Michael. 2023. „Generative KI ist ein Gamechanger“. Zugriff 15.07.2024. <https://www.wissenschaftskommunikation.de/generative-ki-ist-ein-gamechanger-69125/>
- Wissenschaft im Dialog. 2023. "Wissenschaftsbarometer 2023". <https://www.wissenschaft-im-dialog.de/projekte/wissenschaftsbarometer/wissenschaftsbarometer-2023/>
- Wölker, Anja, und Thomas E. Powell. 2021. "Algorithms in the newsroom? News readers' perceived credibility and selection of automated journalism." *Journalism* 22 (1): 86–103.

ÖFFENTLICHE VORTRÄGE UND VERANSTALTUNGEN

Akademie-Vorlesungen im Schloss 2023 „Mobilität in der Zukunft: bedarfsgerecht, sicher und nachhaltig“

Veranstaltungstage: 07.06., 28.06., 16.08., 13.09. und 11.10. (ausgefallen),
15.11. und 12.12.2023

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Stadt Braunschweig

Veranstaltungsort: Kulturinstitut der Stadt Braunschweig, Roter Saal,
Schlossplatz, 38100 Braunschweig



Mobilität beschreibt ganz allgemein die Fähigkeit, sich von sich aus bewegen zu können, einen Ort oder eine Haltung verändern zu können. Mobilität ist ein zentrales gesellschaftliches Bedürfnis und unverzichtbar für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung. Im Vordergrund der individuellen Mobilitätsbedürfnisse steht heute der Verkehr.

Unsere Gesellschaft hat erkannt, dass eine Transformation des Verkehrs mit dem Ziel einer klimaneutralen Mobilität unausweichlich ist. Heute befinden wir uns im Umbruch auf dem Weg zu zukunftsgeeigneten Verkehrssystemen und Verkehrsmitteln, begleitet von Erfolgen, Zweifeln und manch offenen Fragen. Verfügbarkeit, Individualität, Schnelligkeit, Sicherheit, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Erhaltung der Qualität des Lebensraums stehen in Zielkonflikten.

Unsere Region ist führend in der Mobilitätsforschung. In der Vortragsreihe der Akademie-Vorlesungen im Schloss im Jahr 2023 beleuchten führende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Mobilitätsforschung Themen der aktuellen Mobilitätsforschung.

Mittwoch, 07.06.2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr.-Ing. Thomas Siefer

TU Braunschweig, Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb

Die Zukunft der Eisenbahn – integraler Bestandteil nachhaltiger Mobilität

Mittwoch, 28.06.2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger

TU Braunschweig, Institut für Füge- und Schweißtechnik

Fahrzeugleichtbau im Umfeld von Circular Economy und E-Mobility

Mittwoch, 16.08.2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr.-Ing. Arno Kwade

TU Braunschweig, Institut für Bioverfahrenstechnik

Nachhaltige Produktion von Batteriezellen und Zukunftstrends

Mittwoch, 13.09.2023, 18:30 Uhr (ausgefallen)

Prof. Dr.-Ing. Rolf Radespiel

TU Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik

Luftverkehr der Zukunft: Technologie, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit

Mittwoch, 11.10.2023, 18:30 Uhr (ausgefallen)

Prof. Dr.-Ing. Monika Sester

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Kartographie und Geoinformatik

Erfassung und Prädiktion des Verhaltens von Verkehrsteilnehmern

Mittwoch, 15.11.2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr. Meike Jipp

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Verkehrsforschung

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Vorstand Innovation, Transfer und wissenschaftliche Infrastrukturen

Verkehrssysteme gestalten: Energieträger, Angebote und Verkehrsmittel

Dienstag, 12.12.2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr. Vanessa Carlow

TU Braunschweig, Institut für Sustainable Urbanism

Schöne Straßen, nachhaltige Städte: Die Rückgewinnung der Straße als Raum für alle

Die Zukunft der Eisenbahn – Integraler Bestandteil nachhaltiger Mobilität

THOMAS SIEFER

Institut für Verkehrswesen, Eisenbahnbau und -betrieb, TU Braunschweig
Pockelsstrasse 3, 38106 Braunschweig

1 Stellung der Eisenbahn in Deutschland

Das Thema Mobilität ist seit einigen Jahren wichtiger Bestandteil der Diskussionen, wenn es um die Klimafolgenuntersuchung und Verringerung der Schadstoffemissionen geht. Spätestens seit dem Jahr 1994 mit der großen Bahnreform in Deutschland und der Verschmelzung von Deutscher Bundesbahn und Deutscher Reichsbahn zur Deutschen Bahn AG ist das Thema Bahn und Weiterentwicklung der Bahn in das politische Bewusstsein gerückt und zentraler Bestandteil der Entscheidungen im Bundesverkehrsministerium. Unabhängig von der politischen Farbe der Hausleitung wird der Bahn eine wichtige Aufgabe bei der Lösung angehender Mobilitätsprobleme zugewiesen, allerdings bei der Zusecheidung notwendiger Finanzmittel lag die Schiene regelmäßig hinter der Straße. Mit mehr als 33.000 km Streckenlänge hat Deutschland das längste Eisenbahnnetz in Europa, das als Aktiengesellschaft geführt wird, sich aber zu 100% im Besitz der Bundesrepublik Deutschland befindet. Das Streckennetz des Bundes wird ab 1. Januar 2024 als gemeinwohlorientierte Infrastruktur unter dem Namen DB Infra GO AG geführt und ist auch zuständig für die ca. 5.600 Verkehrsstationen im Netz der Eisenbahn. Neben dem Netz in Bundesbesitz gibt es noch knapp 6.000 km Bahnnetz, das sich in Besitz der einzelnen Bundesländer befindet.

Weitere Gesellschaften der Holding Deutschen Bahn AG agieren in den Bereichen Schienenpersonennahverkehr (DB Regio AG), Schienenpersonenfernverkehr (DB Fernverkehr AG) und Schienengüterverkehr (DB Cargo AG). Außerdem gibt es noch eine Vielzahl von Gesellschaften in der Holding, die zum Teil als interne Dienstleister fungieren. Dadurch, dass der Bund alleiniger Eigentümer der DB AG ist, nachdem ein zu Beginn des Jahrtausends angedachter Börsengang abgesagt wurde, kann der Bund über politische Entscheidungen mehr oder weniger direkt in die Strategie der Eisenbahn eingreifen.

Aktuell wird die Diskussion um die Zukunft der Bahn und ihre Aufgaben häufig durch die nun schon mehrere Jahre andauernde Unzuverlässigkeit bestimmt. Instandhaltungsmängel, die zu reduzierten Geschwindigkeiten führen, Bauarbeiten, fehlendes Personal für Stellwerke und in der Folge Zugausfälle bestimmen die Diskussion. Es wird hinterfragt, ob die Bahn weitere Transportaufgaben überneh-

men kann. Hier hilft ein Blick in die europäische Statistik: die Bahnen in anderen Ländern sind deutlich pünktlicher, Deutschland liegt aktuell auf einem der letzten Plätze der 27 EU-Länder. In den zehn pünktlichsten Ländern liegt die Pünktlichkeit deutlich über 90%, während in Deutschland der Fernverkehr unter 70% Pünktlichkeit liegt (erreichen der Bahnhöfe mit maximal 5:59 min Verspätung gilt noch als pünktlich). Ziel muss es also sein wieder eine Pünktlichkeit von deutlich über 90% zu erreichen, dann wird das System Bahn wieder attraktiver.

2 Marktanteile der Eisenbahn am Gesamtverkehr

Die Zunahme des Gütertransports kann durch einen Vergleich zwischen Jahren 1965 und 2015 verdeutlicht werden. In einem Zeitraum von 50 Jahren nahm der gesamte Transport von 174 Mrd. tkm auf 686 Mrd. tkm zu, dies entspricht fast einer Vervierfachung, dabei wurden im Jahr 2015 allein auf der Straße 486 Mrd. tkm transportiert. Aber auch auf der Schiene wurde das Transportaufkommen mit 121 Mrd. tkm mehr als verdoppelt. Insbesondere die Steigerung des Transports mit Lkw geht mit einer deutlichen Zunahme der Treibhausgasemissionen einher, auch wenn die Lkw-Motoren in den letzten 50 Jahren deutlich sauberer geworden sind.

Auch im Personenverkehr gab es eine Steigerung der Verkehrsleistung, die aber deutlich geringer ausfiel. Auch hier ist der Straßenverkehr dominierend. Der Schienenpersonenverkehr (bis 50 km Reiseweite) hat in den letzten 25 Jahren überproportional zugenommen. Interessant ist, dass die Anzahl der Wege kaum zugenommen hat, aber die Wege länger wurden. Die prozentualen Anteile der einzelnen Verkehrsträger zeigt Abb. 1.

▪ Modal Split im SPV und SGV (Stand 2020)

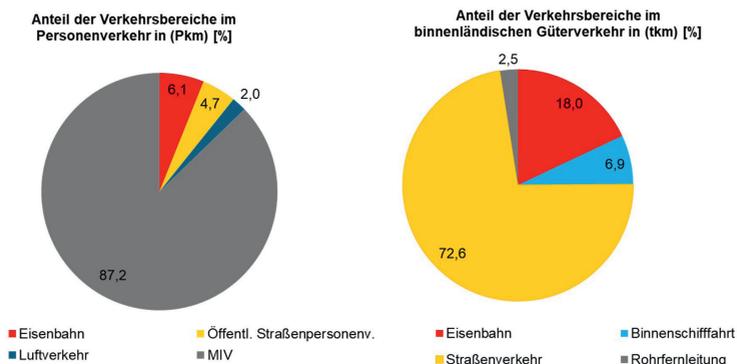


Abb. 1. Anteile der Verkehrsträger
(Quelle: Verkehr in Zahlen 2021/22 (BMDV).

3 Eisenbahn und Energiebedarf

Erklärtes politisches Ziel ist es, den Anteil des Schienenpersonenverkehrs bis 2030 zu verdoppeln, den Anteil des Schienengüterverkehrs auf 25 % zu erhöhen. Die Erhöhung des Schienenverkehrs wird ein wichtiger Baustein bei der Reduktion der Treibhausgasemissionen sein. Die Eisenbahn erbringt bereits heute rund 90 % ihrer Verkehrsleistung mit elektrischer Energie. Dabei hatte im Jahr 2023 durch einen Stromverbund mit Schweden, Norwegen, Österreich und der Schweiz der Strom aus erneuerbaren Energien einen Anteil von 68 %. Dieser hohe Wert wird durch einen Stromverbund mit den Bahnen in der Schweiz, Österreich, Schweden und Norwegen ermöglicht, der eine Frequenz von 16,7 Hz aufweist und damit von den Landesnetzen (50 Hz) getrennt ist.

Bei einer Betrachtung der Treibhausgasentwicklungen seit 1990 ist eine konstante Abnahme festzustellen. Lag der Ausstoß 1990 noch bei 1.251 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten, so sind im Jahr 2022 nur noch 764 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten emittiert worden, dies entspricht einem Rückgang von rund 40 % in 32 Jahren. Bis zum Jahr 2030 ist der Ausstoß auf 438 Millionen Tonnen Kohlendioxid-Äquivalenten zu reduzieren, das ist gleichbedeutend mit einer weiteren Reduktion um 41 % in den kommenden acht Jahren. Diese Zahlen verdeutlichen, dass die bisherigen Anstrengungen nicht genug waren und bis 2030 deutlich verschärft werden müssen (Abb. 2).

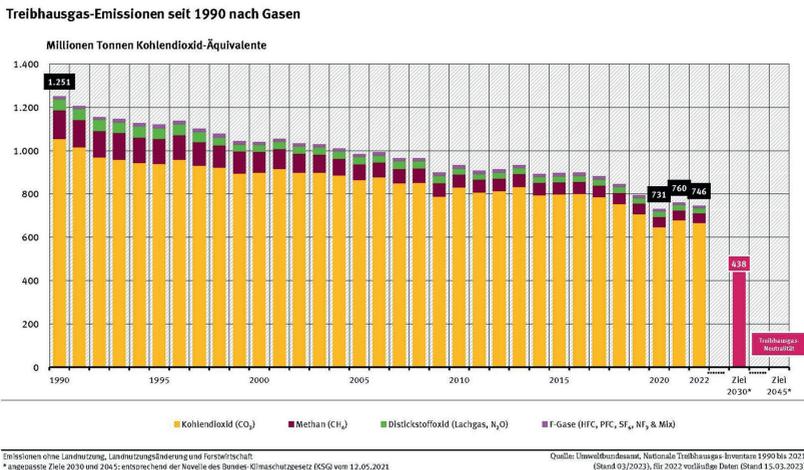


Abb. 2. Treibhausgas-Emissionen seit 1990 nach Gasen (Quelle: Umweltbundesamt).

Um zu verstehen, wo hier die Hebel sind um diese Ziele zu erreichen, muss der Endenergieverbrauch nach Sektoren betrachtet werden, auch wenn die Politik von

den Vorgaben im Jahr 2023 abgegangen ist und nur noch gesamthaft die Energieverbräuche bzw. die Treibhausgase betrachtet (Abb. 3). In den letzten 30 Jahren konnte in den Bereichen Gewerbe, Handel und Dienstleistungen der Endenergieverbrauch um 21 % gesenkt werden, in der Industrie konnte eine Reduktion von 15 % erzielt werden, allerdings auch durch Betriebsschließungen und Verlagerung von Produktion ins Ausland. Der Verkehrssektor erzielte fast keine Reduktion und bei den Haushalten gab es sogar eine Zunahme von etwas über 2 %.

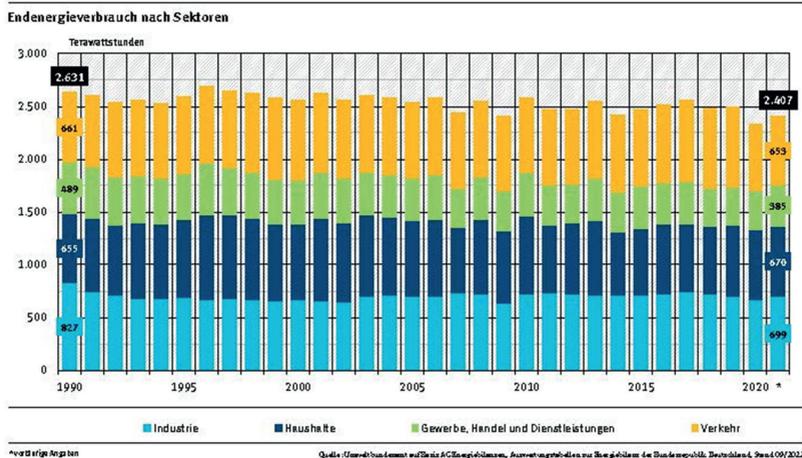
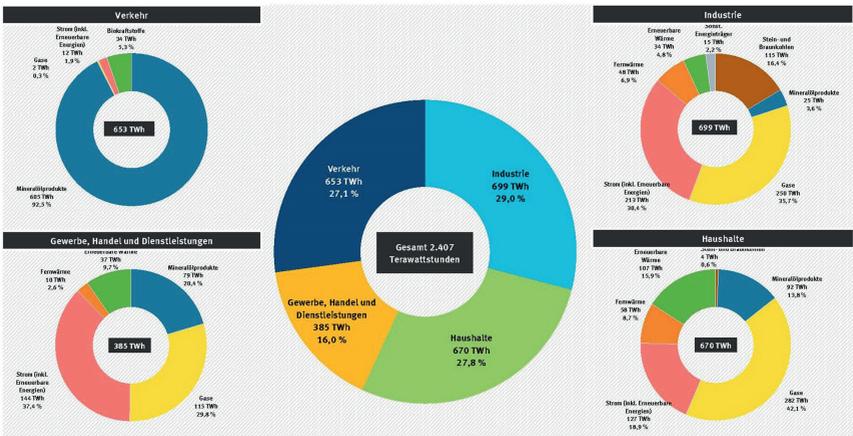


Abb. 3. Endenergieverbrauch nach Sektoren
(Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen).

Nach der globalen Betrachtung des Energieverbrauchs der einzelnen Sektoren geht der nächste Blick auf die Energien in den einzelnen Sektoren. Hier zeigt sich bei einer Betrachtung des Verkehrs, dass er 27,1 % am Gesamtverbrauch verantwortet und dabei wie kein anderer Bereich von Mineralölprodukten abhängig ist. Der geringe Anteil Strom wird fast ausschließlich durch die Eisenbahn hervorgerufen. Hier wird deutlich, dass die Bahn mit Marktanteilen von 6 % bzw. 18 % nur 1,9 % des Energiebedarfs des Verkehrs benötigt. Diese Zahlen zeigen sehr gut, dass der Energiebedarf der Bahn signifikant geringer als der Straße ist. Untersuchungen zeigen, dass die Straße sowohl im Güter-, als auch im Personenverkehr rund siebenmal so viel Energie wie die Bahn benötigt. Berücksichtigt man, dass die Bahn rund 68 % des Stroms schon heute aus regenerativen Quellen bezieht, wird der Klimavorteil der Bahn noch größer. Um die Umweltvorgaben zu erfüllen muss daher der Marktanteil der Bahn in den nächsten Jahren deutlich gesteigert werden.

Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren und Energieträgern*



* vorläufige Angaben Quelle: Umweltbundesamt auf Basis AG Energiebilanzen, Anrechnungsbilanzen zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, Stand 09/2022

Abb. 4.: Endenergieverbrauch 2021 nach Sektoren und Energieträgern (Quelle: Umweltbundesamt).

4 Wie kann die Leistungsfähigkeit der Bahn erhöht werden?

Aktuell wird durch verschiedene Maßnahmen versucht eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Systems Bahn zu erreichen. Dies ist notwendig, um mehr Verkehr auf die Schiene zu bringen. Im Schienenpersonennahverkehr führte die Regionalisierung dazu, dass für den Nahverkehr die Entscheidungen „vor Ort“ getroffen werden und die Angebote besser auf die Nachfrage abgestimmt werden kann. In der Folge ist der Nahverkehr das Segment des Eisenbahnverkehrs, das am stärksten angestiegen ist und in den letzten Jahren das Reisendenaufkommen verdoppelt hat. Seit Einführung des Deutschlandtickets ist die Nachfrage weiter angestiegen.

Auch im Güterverkehr hat es eine deutliche Belebung gegeben, hier macht sich das Aufkommen neuer Eisenbahngesellschaften bemerkbar, die mit maßgeschneiderten Angeboten einzelne Segmente des Güterverkehrs bedienen. So ist der Marktanteil der Deutschen Bahn von fast 100% im Jahr der Bahnreform 1994 inzwischen auf deutlich unter 50% gesunken.

Im Fernverkehr, der auch heute noch zu über 95% von der Deutschen Bahn bedient wird hat es in den letzten Jahren eine leichte Steigerung gegeben. Mit bis zu 140 Mio. Fahrgästen pro Jahr gibt es im Fernverkehr aber deutlich weniger Reisende als im Schienenpersonennahverkehr, der im Jahr 2023 von 2,6 Mrd. Fahrgästen genutzt wurde.

Um die Nutzung der Bahn zu stärken, sollen die positiven Erfahrungen mit vertakteten Verkehren in einem Deutschlandtakt gebündelt werden, der abgestimmte Fahrpläne von Nah- und Fernverkehr bieten soll, bei dem ein Umsteigen zwischen verschiedenen Zügen innerhalb weniger Minuten möglich ist. Außerdem soll auf den wichtigsten Strecken im Fernverkehr ein 30-Minuten-Takt angeboten werden, um Wartezeiten auf die nächste Abfahrt deutlich zu minimieren. Mit einer sauberen Taktung auch im Nahverkehr, Abfahrten immer zur selben Minute in einem festen Raster von 15, 30 oder 60 Minuten ergeben sich weitere Attraktivitätsgewinne. Mehr Züge und bessere Anschlüsse führen zu kürzeren Reisezeiten und damit zu einer besseren Konkurrenzsituation im Wettbewerb mit dem Straßenverkehr.

Mit diesen Maßnahmen soll der Bahnverkehr attraktiver für die Reisenden werden, sodass bei der Verkehrsmittelwahl die Bahn stärker berücksichtigt wird. Mit der Strategie der Angebotsverbesserung sollen die Fahrgäste zur Bahn gezogen (Pull-Maßnahmen) werden, es stellt sich aber die Frage, ob nicht auch durch sogenannte Push-Maßnahmen die Fahrgäste zur Bahn gedrängt werden könnten.

Auch für den Güterverkehr müssen attraktive Strategien entwickelt werden. Es zeigt sich, dass insbesondere bei Transportweiten über 300 Kilometern die Bahn noch große Potentiale hat. Hierfür sind insbesondere aber im Containerverkehr die Möglichkeiten des Wechsels zwischen Straße und Schiene durch weitere Umschlag-Terminals zu verbessern. Die direkte Abfuhr von einzelnen Güterwagen bei Versendern ist in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen, die Anzahl von ca. 12.000 Ladestellen wurde auf ca. 2.500 aufkommensstarke Ladestellen reduziert. Aktuell beginnt aber auch hier gerade wieder ein Umsteuern, dennoch muss für die Verkehre insbesondere die Anzahl der Umschlagterminals erhöht werden.

Es werden aber auch Ausbauten vorhandener Strecken oder der Neubau bereits heute überlasteter Abschnitte erforderlich. Um den Zugang zum System Bahn zu vereinfachen sind außerdem vielfältige Reaktivierungen geplant, damit gar nicht erst das Auto zum Zugang zur Bahn genutzt werden muss, sondern ein Einstieg „vor der Haustür“ möglich wird. Aktuell werden Strecken vorrangig für den Schienenpersonennahverkehr reaktiviert, ein Mitdenken für den Güterverkehr ist aber notwendig. Auch das Angebot an Nachtzügen, insbesondere im europäischen Rahmen, wird wieder ausgebaut.

Bisher wurden Neu- und Ausbaustrecken vornehmlich für den schnellen Personenverkehr gebaut, ohne dass dabei ein durchgängiges Hochgeschwindigkeitsnetz realisiert werden konnte (Abb. 5). Bei der aktuellen Nachfrage nach Güterverkehrsleistungen ist diese Strategie zu überdenken.

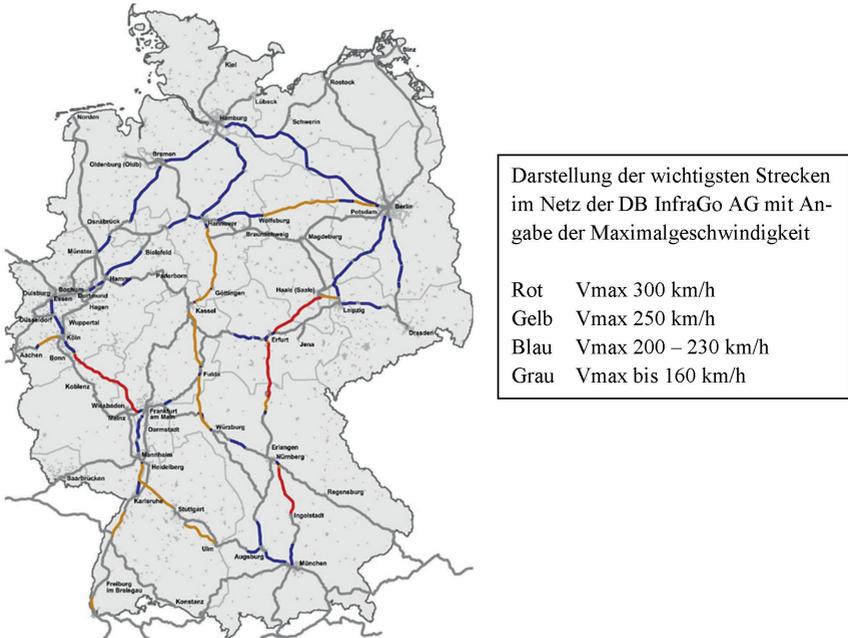


Abb. 5. Wichtige Linien im deutschen Eisenbahnnetz
(Quelle: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Intercity-Express>).

Für ein Konzept unter dem Titel „Deutschlandtakt“ wurde eine Vielzahl von Ausbauten unterstellt, die bis zum Jahr 2030 umgesetzt werden sollten. Inzwischen wird von einer Umsetzung bis zum Jahr 2070 ausgegangen. Vor dem Hintergrund, dass der Neubau von Strecken sich meist über mehrere Jahrzehnte hinzieht und in den nächsten Jahren vorrangig die Instandsetzung der vorhandenen Infrastruktur (Hochleistungskorridore) erfolgen muss, stellt sich die Frage, ob und wie mehr Züge ohne Neubauten gefahren werden können, um die erwünschte Nachfragesteigerung zu ermöglichen. Es müssen Zwischenzustände entwickelt werden. Als ein Zwischenzustand ist eine Ertüchtigung von Bahnhöfen zu sehen, die sich immer häufiger als Engpass erweisen. Hier können oft schon kleine Infrastruktur- anpassungen oder Umbauten der Signaltechnik die Leistungsfähigkeit steigern.

Eine weitere Möglichkeit kann darin liegen, die Geschwindigkeit der Züge auf einer Strecke zu harmonisieren. Mit diesem Vorgehen konnte in der Schweiz die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Infrastruktur gesteigert werden.

In den folgenden Abbildungen werden Fahrpläne in sogenannten Zeit-Weg-Diagrammen dargestellt, der Zuglauf wird waagrecht über die Strecke von links nach rechts dargestellt, der Zeitverbrauch auf der Senkrechten von oben nach unten. Der Zug ist nicht nur ein Strich, sondern wird mit den notwendigen Vorlaufzeiten für die Signalbedienung und die Nachlaufzeiten für die Zuglänge etc. dargestellt. Man kann direkt ablesen, welcher Gleisabschnitt zu welcher Zeit durch den Zug belegt bzw. gesperrt wird. Darum wird diese Darstellung auch Sperrzeit-Treppe genannt.

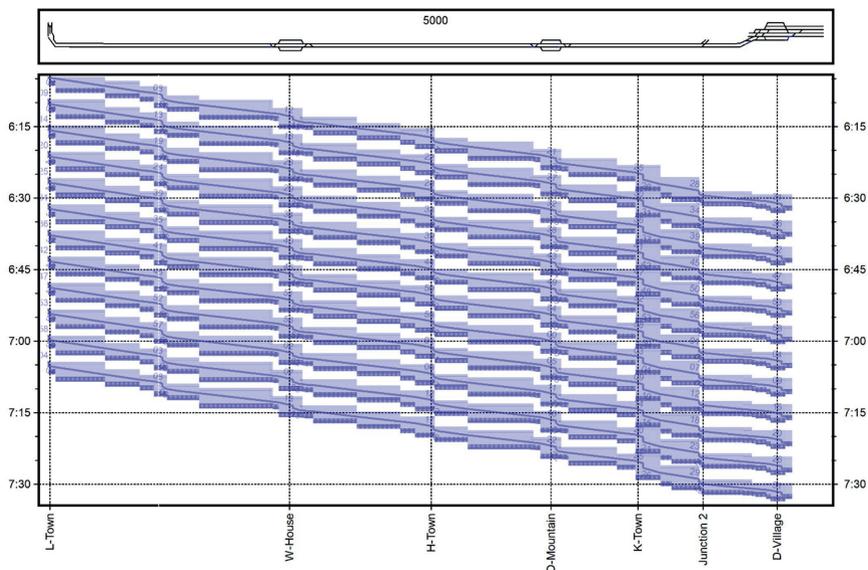


Abb. 6. Strecke mit harmonisiertem Verkehr
(Quelle: eigene Darstellung).

Auf einer Strecke, bei der alle Züge mit ähnlichen fahrdynamischen Eigenschaften verkehren, sind Zugfolgen von 5 Minuten ohne besondere Maßnahmen möglich, es können also 12 Züge/h und Richtung verkehren (Abb. 6). Im reinen S-Bahnverkehr kann die Zugfolge auf 100 Sekunden gesenkt werden. Im sogenannten Mischverkehr, der aktuell in Deutschland üblich ist, verkehren meist nur 5 bis 6 Züge/h und Richtung.

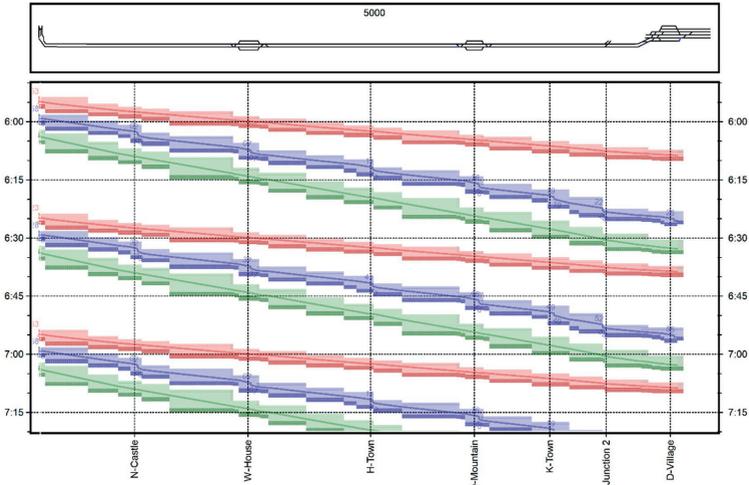


Abb. 7. Strecke mit Mischverkehr (Quelle: eigene Darstellung).

Die Züge mit einer roten Markierung fahren schneller, sie benötigen für eine bestimmte Strecke weniger Zeit als die blauen oder grünen Züge (Abb. 7). Dadurch entstehen Zeitlücken zwischen den einzelnen Zügen, die aber nicht mit anderen Zügen gefüllt werden können. In der Folge können weniger Züge pro Stunde verkehren. Würden die Lücken mit Zügen aufgefüllt, so müssten sie ständig überholt werden. Sie würden so langsam, dass die sich ergebende Reisegeschwindigkeit, nicht marktfähig wäre.

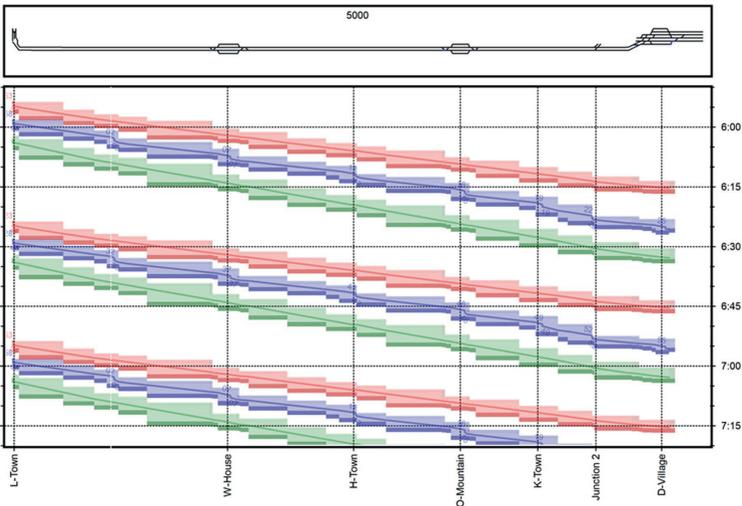


Abb. 8. Strecke mit Mischverkehr, harmonisiert (Quelle: eigene Darstellung).

Werden einerseits die schnellen Züge etwas verlangsamt und andererseits die Geschwindigkeiten im Personennah- und Güterverkehr erhöht, d. h. die Geschwindigkeiten aller Züge harmonisiert, so entstehen zwischen den grünen und roten Zügen Zeitlücken, die für weitere Zugfahrten genutzt werden können (Abb. 8). So kann ohne Neubau von Infrastruktur die Anzahl der verkehrenden Züge gesteigert und somit die Transportmenge im Güter- oder Personenverkehr auf der Schiene erhöht werden. Dies ist eine Möglichkeit die Verfügbarkeit auf hochbelasteten Strecken zu erhöhen.

Es sind aber auch Entwicklungen bei der Fahrzeugtechnik um mit der gleichen Anzahl von Zügen mehr zu transportieren. Im Ausland verkehren bereits auch im Fernverkehr Doppelstockzüge, die pro Zugfahrt mehr Fahrgäste aufnehmen können. Im Nah- und Fernverkehr kann die Fußbodenhöhe an die Bahnsteighöhe angepasst werden, sodass ein schnellerer Ein- und Ausstieg möglich wird, die Haltezeit verkürzt und somit die Zugfolgezeit reduziert werden kann.

5 Zukünftig mehr nachhaltige Mobilität mit der Eisenbahn

Als sogenannte Pull-Maßnahmen können die Fahrpreise im Personenverkehr reduziert werden. Im Nahverkehr zeigt sich, dass durch das Deutschland-Ticket mehr Fahrgäste gewonnen werden können. Eine Dynamisierung der Ticketpreise führt im Fernverkehr zu einer stärkeren Auslastung der Züge in schwächer nachgefragten Zeiten. Damit können einerseits weitere Fahrgäste gewonnen werden, andererseits Überfüllungen in nachfragestarken Zeiten reduziert werden.

Dem stehen sogenannte Push-Maßnahmen gegenüber. Verstärkte Sicherheitskontrollen im Flugverkehr und eine Besteuerung des Flugbenzins können insbesondere Flugreisen im innerdeutschen Verkehr unattraktiver machen und so Fahrgäste in die Züge bringen.

Entsprechendes gilt auch für den Güterverkehr. Erhöhungen der Streckenmaut im Lkw-Verkehr in Verbindung mit einer stärkeren CO₂-Besteuerung und Einschränkungen der Traglast bei Brücken, sowie eine verstärkte Kontrolle der Lenk- und Ruhezeiten machen den Gütertransport mit der Bahn interessant. Mehr Containerterminals bieten verbesserte Umlade-Möglichkeiten zwischen Straße und Schiene. Auch wenn aus den Häfen bei Transporten über 300 km bereits 70 % des Verkehrs über die Schiene erfolgt, sind auch gerade hier noch weitere Verlagerungen möglich.

Die Ausführungen zeigen, dass Bahnverkehr sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr attraktiver werden kann. Die aktuellen Entwicklungen zeigen, dass die Bahn trotz derzeitiger Schwächen stärker nachgefragt wird als je zuvor.

Durch den generell geringeren Energiebedarf durch die deutlich kleinere Haftreibung Schiene – Stahlrad im Vergleich zu Straße – Gummirad ist die Nachhaltigkeit beim Transport mit der Bahn jetzt und zukünftig gegeben. Bereits heute werden 90 % der Transporte mit elektrischer Traktion durchgeführt, über 60 % kommen aus regenerativen Quellen, bis 2038 wird dieser Wert auf 100 % gesteigert.

Um den Einsatz von Dieselmotoren kurzfristig zu reduzieren werden als Brückentechnologie seit 2023 Batterie-elektrische Fahrzeuge oder Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb eingesetzt. Um die Treibhausgase beim Einsatz von Dieselmotoren weiter zu reduzieren, können die Fahrzeuge ab sofort vollständig mit HVO 100 (Hydrotreated Vegetable Oils – mit Wasserstoff behandelte Pflanzenöle) betankt werden, was die Treibhausgase um 90 % reduziert.

Die Nachhaltigkeit der Bahn hilft die angestrebten Umweltziele im Bereich Mobilität zu erreichen. Der Energiebedarf des Verkehrs muss gesenkt werden, die Treibhausgase drastisch reduziert werden. Dabei muss der gesamte Verkehr neu gedacht und geordnet werden. Nur durch eine Elektrifizierung des Straßenverkehrs werden die Ziele nicht erreicht werden, eine Verlagerung auf Verkehrssysteme mit deutlich weniger Energiebedarf ist erforderlich. Die Bahn wird ihren Beitrag zu nachhaltiger Mobilität in der Zukunft leisten können.

Vortragsreihe im phaeno Wolfsburg „Energiewende“

Veranstaltungstage: 15.11., 22.11. (Nachholtermin 25.01.2024), 29.11. und
7.12.2023

Veranstalter: Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft
Akademie der Wissenschaften zu Göttingen
phaeno Wolfsburg

Veranstaltungsort: phaeno Wissenschaftstheater, Willy-Brandt-Platz 1,
38440 Wolfsburg
vor Ort oder im Livestream

Die Energiewende ist ein Thema, das uns jeden Tag in den Medien begegnet. Doch was bedeutet das eigentlich konkret für die Industrie oder die Energieversorgung? Wie können wir die Energiewende gemeinsam umsetzen? Dieser Frage widmet sich die Ausstellung „Power2Change: Mission Energiewende“, die von Partnerinnen und Partner aus der Forschung, dem Museumsbereich und der Wissenschaftskommunikation gemeinsam entwickelt wurde und vom 26. September 2023 bis 4. Februar 2024 im phaeno in Wolfsburg zu sehen ist (www.phaeno.de/power2change). Die Wanderausstellung wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Passend zur neuen Sonderausstellung haben die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft und die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen für die neue Vortragsreihe vier Referentinnen und Referenten aus unterschiedlichen Fachrichtungen gewonnen, die zum Thema „Energiewende“ forschen.

Mittwoch, 15. November 2023, 18:30 Uhr

Prof. Gerhard Wörner
Universität Göttingen

Metallische Rohstoffe Kritische Metall-Ressourcen der Energiewende

Die Begrenzung des Anstiegs globaler Temperaturen erfordert den Ausbau bestehender und Entwicklung neuer Technologien. Hiermit ist ein starker Anstieg des Bedarfs an Metall-Rohstoffen (Li, Co, Ni, Cu und Seltene Erden Elemente) ver-

bunden. Das kritische Verhältnis zwischen verfügbaren und den für eine Mobilitäts- und Klima-Wende notwendigen Mengen an Metallen wird in diesem Vortrag beleuchtet. Der Bedarf an diesen Metallen kann nicht durch die Steigerung des Abbaus bekannter Vorkommen gewährleistet werden. Recycling aus bestehenden Materialien ist keine Lösung. Dass durch den Ausbau alternativer Energien und mit „technologie-offener“ Wirtschaftspolitik unser Energiebedarf, unser Ressourcenverbrauch und unsere Mobilität erhalten oder gesteigert werden könnten, sind unhaltbare Versprechen. Was sind die Konsequenzen?

Mittwoch, 29. November 2023, 18:30 Uhr

Prof. Katharina Kohse-Höinghaus
Universität Bielefeld

Emissionen Verbrennung im Kontext von Klima und Energiewende

Immer noch stammt etwa 80 % der genutzten Primärenergie aus fossilen Quellen. Zweifellos müssen Emissionen von Klimagasen und Schadstoffen aus der Verbrennung dringend reduziert werden. Verkehr, Energiewirtschaft, Bereitstellung von Wärme und industrielle Prozesse erfordern allerdings unterschiedliche Lösungen. Der Vortrag will anhand aktueller Forschungsfragen zur Diskussion anregen. Dabei werden alternative Brennstoffe (wie Wasserstoff, Ammoniak, Ether, nachhaltige Flugtreibstoffe, Metalle), die Speicherung und Kombination mit erneuerbarer Energie sowie neuartige Prozesse (Plasma, Pyrolyse, Materialerzeugung) beispielhaft vorgestellt.

Donnerstag, 7. Dezember 2023, 18:30 Uhr

Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach
Leibniz Universität Hannover

Elektrische Energieversorgung Energiewende aus der Sicht der elektrischen Energieversorgung

In diesem Vortrag wird die elektrische Energieversorgung näher betrachtet, ohne dabei zu vernachlässigen, dass elektrische Energie auch einen Beitrag zur Energiewende im Wärmebereich liefern kann. Früher war die elektrische Energieversorgung sehr einfach strukturiert: an zentralen Stellen wurde die Energie bereitgestellt und anschließend über Übertragungs- und Verteilungsnetze zu den Verbrauchern gebracht. Im Zuge der Energiewende mit dezentralen Erzeugern,

die zum größten Teil auch noch sehr volatil in ihrer Erzeugung sind, Beispiel Windkraftanlage oder Photovoltaik, sind sehr viele verteilte Erzeugungsanlagen entstanden und der Energiefluss ist nicht mehr auf eine Richtung begrenzt. Zusätzlich wird die Energiewende durch politische Entscheidungen beeinflusst.

Mittwoch, 25. Januar 2024, 18:30 Uhr

Prof. Dr.-Ing. Raimund Rolfes
Leibniz Universität Hannover

Windanlagen

Offshore Megastrukturen: Zukünftige Energieversorgung durch Windenergieanlagen neuer Dimension

Ein wesentlicher Pfeiler unserer zukünftigen Energieversorgung wird die Windenergie sein. Auf See (offshore) werden Anlagen der Zukunft voraussichtlich Rotordurchmesser von über 300 m aufweisen und Leistungen von mehr als 20 GW bereitstellen. Wie können diese größten jemals von Menschenhand gebauten rotierenden Maschinen so entworfen und betrieben werden, dass Nachhaltigkeit unserer Energieversorgung mit hoher Zuverlässigkeit einhergeht? An welchen Antworten arbeitet die Forschung?

Kritische Rohstoffe der Energiewende: wieviel, woher und reicht das?

GERHARD WÖRNER

Abt. Geochemie und Isotopengeologie, Geowissenschaftliches Zentrum Universität Göttingen, Goldschmidtstraße 1, 37077 Göttingen

1 Worum geht es?

Spätestens jetzt, seit wir die Auswirkungen des Klimawandels auch bei uns deutlich spüren, wird uns klar, dass eine Begrenzung der globalen Erwärmung den Ausbau neuer Formen der Energie-Versorgung der Menschheit erfordert. Hiermit ist unweigerlich ein starker Anstieg des Bedarfs an Metall-Rohstoffen verbunden, vor allem, aber nicht nur Kobalt, Seltene Erden Elemente (SEE), Nickel, Kupfer und Lithium. Die unsichere Versorgung dieser „kritischen“ Metalle, die für die anstehende Mobilitäts- und Energie-Wende essentiell sind, steht inzwischen in der öffentlichen Diskussion. Dabei wird vor allem die Abhängigkeit von einzelnen Lieferländern thematisiert. Aus geowissenschaftlicher und ökonomischer Sicht ergeben sich jedoch weitere Fragen: Woher kommen die Metalle, welche Mengen werden gebraucht und kann die massive Steigerung des Abbaus der erforderlichen Rohstoffe gewährleistet werden? Weltweit wird ein massiv steigender Energie- und Ressourcenverbrauch, und weiter zunehmende globale Mobilität prognostiziert. Technologie-offene Energie-, Wirtschafts- und Rohstoffpolitik und ein „weiter-so“ in unserem Verbrauch sind unhaltbare Versprechen, und Recycling ist bei wachsendem Bedarf keine kurzfristige Lösung. Was sind die Konsequenzen?

1.1 Klimawandel und kritische Rohstoffe im Kontext

Die sichere Versorgung mit kritischen Rohstoffen muss aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet werden (Abb. 1): Die Geowissenschaften bieten Kontext und Befunde zur Bewertung des Klimawandels und seiner Folgen sowie zur Verfügbarkeit von natürlichen Rohstoffen der Erde.

Aus den ICCP-Berichten, die die Ursachen und Folgen des Klimawandels wissenschaftlich beschreiben, ergibt sich zwingend der Umbau der globalen Energieversorgung. Damit massive negative Folgen der Erderwärmung in den kommenden ca. 100 Jahren noch abgemildert und dafür die Wirkung von Kipppunkten im Klimasystem vermieden werden können, muss die weitere Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre jetzt verhindert werden. Die Befunde der Geowissenschaft zeigen, dass sich das Klima im Verlauf der Erdgeschichte viel-

fach und stark, aber niemals so schnell wie jetzt verändert hat. Das Jahr 2023 war das wärmste Jahr seit der Temperatur-Messungen und eine Temperatur-Erhöhung von maximalen 1,5 °C, die nach dem Pariser Klima-Abkommen unbedingt einzuhalten sind, wurden 2023 erstmalig für mehrere Monate in Folge überschritten. Mit der derzeitigen weiteren Zunahme an Treibhausgasen liegen wir auf einem Pfad der Temperaturerhöhung bis zum Jahr 2100 von + 3 °C. Geowissenschaftliche Daten zur Klimageschichte der Erde sagen uns, dass vergleichbar hohe Temperaturen auf der Erde vor ca. 5,3 Millionen Jahren an der Wende Miozän – Pliozän herrschten, also vor über 2,5 Millionen Jahren und vor der Entstehung der Gattung Homo. Natürliche Klimaänderungen ähnlicher Größenordnung fanden auch am Ende der letzten Eiszeit statt aber über einen Zeitraum von ca. 1000 Jahren. Innerhalb von nur ca. 150 Jahren hat Homo Sapiens unser Klima dramatisch verändert wie nie zuvor in der Geschichte unseres Planeten.

Ein Widerspruch zu diesen wissenschaftlichen Befunden wäre der Ausdruck einer ökonomischen Wachstumsideologie, die unsere Zivilisation nun existenziell bedroht und der Prämisse „weiter so“ und „immer mehr ist immer besser“. Ein anderer Grund, sich den Konsequenzen aus dem Befund zu entziehen, sind psychologische Mechanismen und menschliche Verhaltensweisen, die in der Urzeit von Homo Sapiens geprägt wurden, dessen „Weisheit“ aber in einer technologisch und ökonomisch geprägten Welt nicht mehr viel bewirkt. Weitsicht und Altruismus im menschlichen Verhalten sind nicht darauf optimiert Probleme anzugehen, die räumlich und zeitlich weit außerhalb unserer direkten Umgebung und Lebenszeit liegen. Überbevölkerung und Überkonsum gehen letztlich auf archaische Prägungen des Verhaltens des Homo Sapiens zurück.

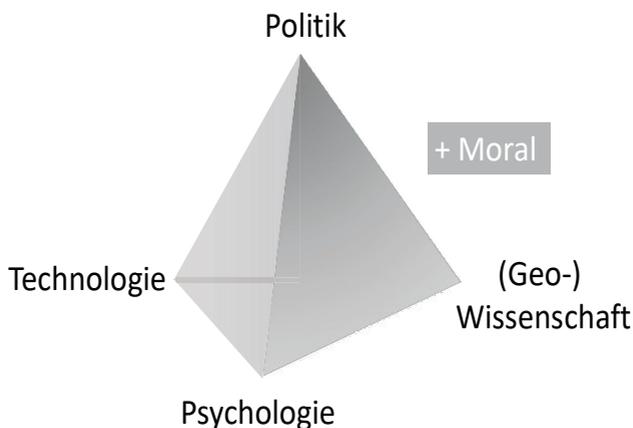


Abb. 1. Agenten von Verbrauch, Versorgung und Sicherung von Rohstoffen im Klimawandel.

Die „Individualisierung“ globaler Probleme nach dem Motto „*nicht der Diesel ist das Problem, sondern die vielen Menschen, die immer noch einen Verbrenner fahren*“ dient nur dazu, den notwendigen politischen Entscheidungen aus dem Weg zu gehen oder dem Diktat eines freien Markts zu folgen. Es sind aber vor allem die Regeln und politischen Entscheidungen, die jetzt und sicher auch noch in den nächsten 100 Jahren die notwendigen Schritte zu einer neuen Lebens- und Wirtschaftsform einleiten müssten, damit das Klima unserer Erde und unsere Zivilisationen in einem sicheren Korridor gehalten werden können.

Menschliche Intelligenz und die Psychologie menschlichen Verhaltens, Bedarf, Verfügbarkeit und Konsum von natürlichen Rohstoffen und politische Entscheidungen finden schließlich in der Entwicklung neuer Technologien ihre Ursache und Konsequenz. Die Folgen diesen Tuns haben auch moralische Implikationen dort, wo unser Ressourcen- und Umwelt- „Verbrauch“ zur Realisierung der Energie- und Mobilitätswende die Lebensbedingungen von Menschen in anderen Teilen der Welt beeinträchtigen.

Dieser Beitrag befasst sich mit der Frage des Bedarfs (Abb. 2), der Verfügbarkeit und der Konsequenzen eines massiv steigendem Rohstoffkonsums als Grundlage

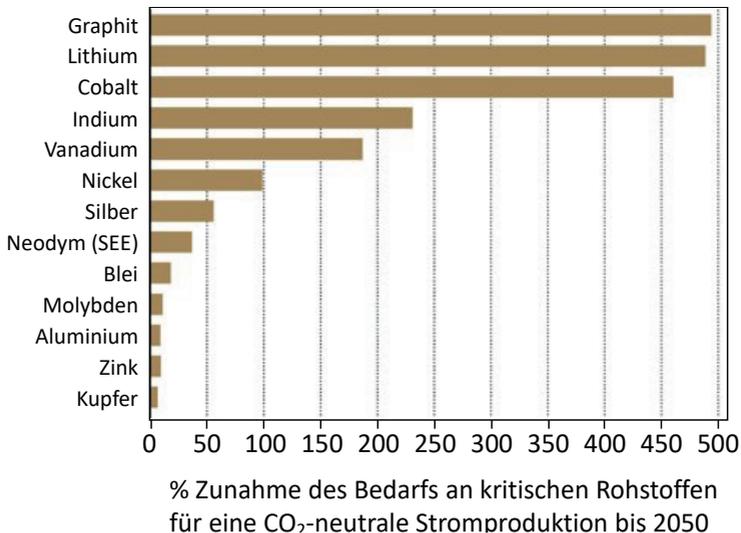


Abb. 2. Anstieg des Bedarfs an Energie-kritischen Rohstoffen bis 2050¹, geändert nach Oncken et al (2022)².

¹ Weltbank: Minerals for Climate Action 2020.

² Oncken O, von Blanckenburg F, Wörner G, Schlosser P (2022) Erdsystemwissenschaft – Forschung für eine Erde im Wandel. Zukunftsreport Wissenschaft, Leopoldina Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle, https://doi.org/10.26164/leopoldina_03_00590.

technologischer Lösungen der Klimakrise. Dabei zeigt sich für die kritischen Metalle, Kobalt, Nickel, Kupfer und Lithium, ein jeweils ähnliches Bild: Zwischen dem erforderlichen Bedarf und den derzeit bekannten und zugänglichen Rohstoff-Reserven bzw. die zu erwartenden aber noch nicht erschlossenen und nicht zugänglichen Rohstoff-Ressourcen besteht eine erhebliche Lücke. Noch ist nicht klar, wie diese Lücken geschlossen werden können.

Abb. 2 zeigt den prognostizierten Bedarf an Rohstoffen für den Ausbau regenerativer und vollständig CO₂-freier Strom-Produktion bis 2050. Der Abbau der kritischen Rohstoffe hat unweigerlich einen erhöhten Energieeinsatz zur Folge, der wiederum durch erhöhten Einsatz von Rohstoffen erreichbar ist. Für die wichtigsten kritischen Rohstoffe besteht darüber hinaus eine viel diskutierte Abhängigkeit von wenigen Lieferländern (Abb. 3).

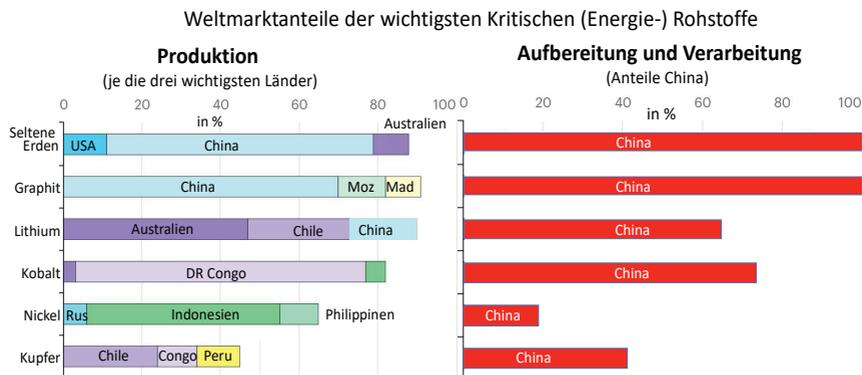


Abb. 3. Die Abhängigkeit von den drei wichtigsten Lieferländern für Rohstoffe bezieht sich gerade auch auf Rohstoffe, die für den Ausbau regenerativer Energieproduktion und e-Mobilität besonders kritisch sind (vergl. Abb. 2.). Moz: Mozambique, Mad: Madagascar, Rus: Russland. Modifiziert nach³.

Viele der hier aufgezeigten Probleme sind für die unterschiedlichen Rohstoffe ähnlich, dieser Beitrag beleuchtet die Problematik der kritischen Metalle aber aus jeweils unterschiedlichem Blickwinkel. Am Ende wird die Frage aufgeworfen welche Konsequenzen aus dieser Analyse gezogen werden können und müssen.

³ Modifiziert nach: IEA, International Energy Agency Publications, Critical Minerals Market Review 2023, Website: www.iea.org, IEA. Licence: CC BY 4.0

2 Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe für die Energie- und Mobilitätswende

Selten Erden Elemente

Die Selten Erden Elemente (SEE) sind eine Gruppe von Metallen, die vielseitige technische Anwendungen haben, von der Herstellung von speziellen Gläsern, über Legierungen für besondere technische Anforderungen bis zu den Neodym-Eisen-Bor Permanentmagneten, die in Motoren und Windrädern genutzt werden. Für eine moderne Windkraftanlage werden ca. 300 bis 350 kg Selten Erden Elemente (Nd, Dy) benötigt.

Viele Berichte in den Medien, von Verbänden (z.B. VDMA⁴), Rohstofflieferanten und Publikationen der Rohstoff-Forschung haben den Bedarf und die Abhängigkeit von China, das den Weltmarkt der Selten Erden Metalle zu 90 % kontrolliert, betont. Im Jahr 2022 wurden weltweit ca. 50 kt des Selten Erdenmetalls Neodym gefördert, 2050 werden es über 115 kt sein⁵, wenn der Ausbau regenerativer Energien das Ziel einer CO₂-freien Energieproduktion erreicht werden soll.

Soll zudem die noch zu steigernde Energie-intensive Förderung, Aufbereitung und Abtrennung der Selten Erden Element klima-neutral erfolgen, so ist dies mit einer weiteren Zunahme des Energie-Verbrauchs verbunden, der durch weitere Steigerung der Stromproduktion erreicht werden müsste. Aufgrund der für den Betrieb großer Bergwerke und Förderfahrzeuge erforderlichen Energiedichte werden diese mit synthetischen Kraftstoffen (*e-Fuels*) betrieben werden müssen, deren Produktion einen sechs- bis achtfach erhöhten Stromverbrauch gegenüber elektrischen Fahrzeugantrieben hat. Die damit verbundenen Mehrkosten der Förderung sind vermutlich bislang nicht bei der Projektion der Weltmarktpreise für kritische Rohstoffe einbezogen. Wer aber als Privatperson in der Zukunft sein Fahrzeug mit sog. e-Fuels betreiben möchte, sollte schon jetzt mit entsprechend erhöhten Reisekosten rechnen.

Bergbau-Aktivitäten sind auch immer mit erheblichen Eingriffen in die Natur verbunden, und besonders bei der Gewinnung und Abtrennung der SEE werden radioaktive Rückstände freigesetzt, da diese Elemente in den Erzmineralen in der Regel mit Uran und Thorium vergesellschaftet sind. In einigen Lieferländern werden die Auflagen für sichere Arbeitsbedingungen und zur Vermeidung von Umweltschäden im Bergbau oft nicht eingehalten, um Kosten zu sparen. Es besteht also die Gefahr, dass eine „saubere“ Elektromobilität und Energieversorgung in Deutschland durch erhöhte Umwelt- und CO₂-Belastungen an anderen Orten der Welt erkauft wird. Dies und die große Abhängigkeit der gesamten Welt von der

⁴ Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) „Kritische Mineralien für den Windenergieanlagenbau“

⁵ Data Source: United Nations Framework Convention on Climate Change, Critical Mineral Data Explorer, last updated 11 July 2023: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>

Lieferung von Selten Erden Elementen und deren Produkte aus China ist inzwischen erkannt. Die Maßnahmen, die von der EU im November 2023 beschlossen wurden, sehen eine Reduzierung dieser Abhängigkeit bis 2030 auf 65 % der derzeitigen SEE Importe vor.⁶ Wenn aber gleichzeitig der Bedarf zwischen 2022 und 2030 um 100 % steigt, sind diese Beschlüsse erkennbar keine Lösung.

Kobalt

Kobalt ist zusammen mit Nickel und Lithium ein Schlüssel-Element bei der Produktion leistungsfähiger Batterien für die Stromspeicherung. Auch wenn hier wie bei den SEE-Forschungen zur Substitution mittelfristige Lösungen andeuten, finden wir zahlreiche Berichte über die zunehmende Lücke zwischen dem steigenden Bedarf und der immer noch unzureichenden Förderung von Kobalt über einen Zeitraum der kommenden Jahrzehnte. Die Demokratische Republik Kongo ist mit Abstand das größte Kobalt produzierende Land (Abb. 3). Berichte darüber, dass auch Kinder mit der Hand aus Flüssen, Abbauhalden großer Minen und kleinsten Gruben Kobalt-Erze schürfen, die dann – mit zusammen mit industriell abgebauten Erzen – in den internationalen Lieferketten, vor allem mit Richtung China landen, sind hinlänglich aus den Medien bekannt. Diese „artisanalen“ Abbau-Praktiken wurde unter anderem von der Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) ausführlich dokumentiert.⁷

Auch hier gilt, dass die Suche und der Abbau neuer Lagerstätten die Versorgungslücken nicht so schnell schließen können, wie der Bedarf dies erfordern würde. Für Kobalt wird eine Produktionssteigerung bis 2050 auf über 460 % geschätzt (Abb. 2). Zwischenzeitliche Produktionssteigerungen um 100 % von 2017 bis 2025 wurden von McKinsey wie folgt projiziert⁸: Aufarbeitung alter Abraumhalden mit neuen Verfahren der Säure-Ätzung (+ 30 %), gesicherte neue Reserven (+ 7 %), Recycling (+ 15 bis 17 %), Ressourcen, die in der Zukunft abgebaut werden *könnten* (+ 31 %). Es wird in der McKinsey-Analyse angenommen und wird offenbar auch allgemein hingenommen, dass weitere 15 % des Kobalts, 23.000 Tonnen allein in der DR Kongo, wie bisher durch ausbeuterische artisanale Erzgewinnung zusätzlich auf den Weltmarkt geliefert werden.

Nickel

Nickel hat vielseitige Verwendungen in der Produktion von rostfreiem Stahl, Legierungen und Katalysatoren. Der Einsatz von Nickel in Akkus zur Stromspei-

⁶ dpa-infocom, dpa:231113-99-933704/4.

⁷ Vetter S., Schulte P (2019) BGR-Report (2019) Analyse des artisanalen Kupfer-Kobalt Sektors in den Provinzen Haut-Katanga und Luabala in der Demokratischen Republik Kongo. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. ISBN 978-3-943566-67-3.

⁸ Azevedo M, Campagnol N, Hagenbruch T, Hoffman K, Lala A (2018) Lithium and Cobalt – a tale of two commodities. Metals and Mining, McKinsey & Company, June 2018. <https://acap.com.au/corporate/>.

cherung hat – noch – einen relativ geringen Anteil der Nutzung dieses Metalls. Allerdings wird bis 2050 ein massiver Anstieg um das 19-fache für die zukünftig notwendige Produktion von Stromspeichern vorhergesagt. Bislang wurde Nickel vorwiegend in Kanada, Australien, Russland und Brasilien aus sog. magmatischen Sulfidierz-Lagerstätten gewonnen (zusammen 720 kt Ni). Das russische „NorNickel“ Bergbauunternehmen ist der weltweit größte einzelne Nickel-Lieferant und betreibt im sibirischen Norilsk eine der größten Nickelminen der Welt. Die Umweltschäden durch den Bergbau hat die Stadt Norilsk zu einer der schmutzigsten Orte der Welt gemacht. Diese Mine in Russland ist heute der Hauptlieferant für Nickel nach Deutschland.

Inzwischen dominieren jedoch mit jährlich 2.430 kt Nickel die Bauxit-Vorkommen in Indonesien, den Philippinen und Neukaledonien⁹ den Weltmarkt. Bis 2025 wird der Bedarf an Nickel auf 3.400 kt geschätzt. Der größte Teil dieses Anstiegs geht also auf die neuen, Ni-reichen Bauxitvorkommen zurück. Die Gewinnung von Nickel aus dem oberflächen-Abbau dieser tropischen Verwitterungsböden ist zwar relativ einfach und konnte in den letzten Jahren sehr schnell von 2010 bis 2018 fast verdreifacht werden, aber die Zerstörung tropischer Vegetation und vor allem die Energie-aufwendige Abtrennung des Nickels aus dem Erz bedingen, dass Nickel aus tropischen Bauxiten zum Vergleich zu den bisherigen Sulfid-Lagerstätten einen um den Faktor 4- bis 10-fach höheren CO₂-Fußabdruck hat.¹⁰ Auch wenn neue Batterie-Technologien den Einsatz von Nickel – zumindest teilweise – durch andere Metalle ersetzen, wird von einem weiteren Anstieg des Nickel-Bedarfs bis 2050 um 100 % ausgegangen. Die Recyclingrate für Nickel ist derzeit wie beim Kobalt (35 %) mit 34 % schon relativ hoch,¹¹ daher ist es fraglich wie signifikante zusätzliche Anstrengungen zum Recycling von Nickel technisch und wirtschaftlich möglich sind.

Kupfer

Die Kupfer-Gold-Molybdän Lagerstätten des sog. „Porphyry-Typs sind die Hauptlieferanten von Kupfer für den Weltmarkt. Cooke et al (2020)¹² haben für die „Porphyry-Lagerstätten“ den typischen zyklisch wechselnden Verlauf von Exploration und Lagerstättenfunden zwischen 1950 und 2000 dargestellt. (Abb. 4) Diese Zyklen gehen darauf zurück, dass stark steigende Produktion aus bekannten

⁹ <https://www.statista.com/statistics/264642/nickel-mine-production-by-country/>.

¹⁰ FPX Nickel Reports Potential to Achieve Production with Lowest Carbon Footprint in Global Nickel Industry (2021): Sources: 1 FPX analysis based on September 2020 PEA; 2 “Life Cycle Assessment of Nickel Products” (Mistry et al., 2016); 3 “Assessing the Energy and Greenhouse Gas Footprints of Nickel Laterite Processing”

¹¹ Hilgers et al (2020) Bergbau Verhüttung Recycling: Ist die deutsche Nachfrage und das Angebot an Rohstoffen resilient? Thinkthank Industrielle Ressourcenstrategien – KIT, 72 p.

¹² Cooke et al (2020) Recent advances in the application of mineral chemistry to exploration for porphyry copper-gold-molybdenum deposits: detecting the geochemical fingerprints and footprints of hypogene mineralization and alteration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 20: 176-188. <https://doi.org/10.1144/geochem2019-039>.

Lagerstätten die Weltmarktpreise reduziert, wodurch Investition in die Explorati-
on neuer Lagerstätten zurückgehen. Wenn dann aber der Bedarf weiter steigt bzw.
wegen geringerem Gewinn die Produktion aus bekannten Lagerstätten zurück-
geht, steigt der Weltmarktpreis und dies führt zu steigenden Investitionen in die
Prospektion und Entwicklung neuer Lagerstätten.

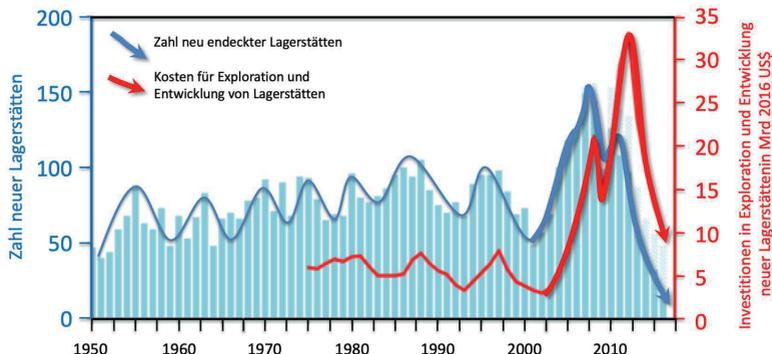


Abb. 4. Investitionen in die Suche und Entwicklung von Kupfer „Porphyry Lagerstätten“ seit 1950 (rote Linie) und die Zahl der erschlossenen neuen Rohstoffvorkommen (blau), modifiziert nach⁹.

Zwischen 2005 und 2015 sind die Investitionen in die Suche nach neuen Kupfer-Ressourcen zunächst angestiegen, während die Zahl der tatsächlich neu gefundenen Lagerstätten deutlich zurückging. Stark schwankende Weltmarktpreise bei massiv steigendem Bedarf und zunehmenden Marktunsicherheiten haben bei Kupfer vermutlich zu diesem Bruch und ungewöhnlichen Schwankungen zwischen Investitionen und der Entwicklung neuer Lagerstätten geführt. Im Ergebnis ist die Zahl der neuen Kupfer-Lagerstätten in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen, obwohl die Energie- und Mobilitätswende in den nächsten Dekaden einen starken Anstieg der Kupferproduktion erfordert.

Anders als andere kritische Metalle wird Kupfer in großen Mengen abgebaut: 25,5 Mt Cu pro Jahr (2022), davon 5,7 Mt für regenerative Energie-Produktion.¹³ Daher ist der relative Anstieg des Bedarfs bis 2050 auf ca. 40 Mt Cu/Jahr (Abb. 2), hauptsächlich durch den enormen Zuwachs für Produktion regenerativer Energie und Mobilität vergleichsweise gering. Es geht dabei aber um sehr große absolute Mengen an Kupfer, und eine Verdoppelung der Kupferproduktion in dieser Größenordnung ist zwangsweise mit erheblichen Anstrengungen in der Exploration und dem Ausbau neuer großer Lagerstätten, technischen Herausforderungen, Preiserhöhungen und nicht zuletzt drastischen Umwelteinwirkungen verbunden. Da die Entwicklung neuer Lagerstätten in der Regel 15 bis 20 Jahre

¹³ Data Source: United Nations Framework Convention on Climate Change, Critical Mineral Data Explorer, last updated 11 July 2023: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/critical-minerals-data-explorer>.

dauert, ist die Bereitstellung der benötigten Mengen an Kupfer noch nicht gesichert.^{14, 15}

Lithium

Die zukünftige Steigerung der Förderung des „leichten“ Elements Lithium hat vermutlich bislang den größten Widerhall in den Medien gefunden. Zu offensichtlich ist die Abhängigkeit dieses Elements zur Speicherung von Strom. Das leichte und kleine Element besitzt nur ein einzelnes Elektron auf der äußeren Schale und ist daher als Elektrolyt zum Transport und Speicherung von Strom bei weitem das effizienteste Metall. Lithium kommt in zwei sehr unterschiedlichen geologischen Kontexten vor: Als Mineral-bildendes Element in Anreicherungsprodukten der Entwicklung von Magmen in der Erdkruste (sog. Pegmatit-Lagerstätten) und zum anderen als Bestandteil von Salzen, die in Extrem-Trockengebieten der Erde an der Oberfläche durch Verdunstung angereichert werden. Australien ist die hauptsächliche Quelle der Li-Vorkommen des ersten Typs, während die Atacama-Wüste und die dortigen vulkanischen Landschaften in den Anden aber auch die Trockengebiete im Westen der USA heute die Hauptliefergebiete für Lithium aus Salzseen sind. Vor allem in Chile, im westlichen Argentinien und in Bolivien werden zur Förderung von Lithium salzhaltige Wässer aus der Tiefe von Salzseen gefördert, und in großen Becken verdunstet, um das Lithium als Karbonat zu gewinnen. Im Salar de Atacama (Chile) bedecken diese Verdunstungsbecken inzwischen eine Fläche von 50 km*75 km, weitere Abbaugbiet im bolivianischen Salar de Uyuni, dem größten Salzsee der Erde, sind geplant.

Der Stromspeicher eines jeden großen Elektro-Autos birgt ca. 20 bis 50 kg Lithium. Die Förderung von Lithium hat nicht nur erhebliche Umwelteinwirkungen und eine Gefährdung der Wasserversorgung in der Region zur Folge. Aufbereitung von 50 kg Lithium haben je nach Abbau und Gewinnungsbedingungen einen CO₂-Fußabdruck von ca. 280 bis 1600 kg CO₂. Das sind zwischen 2- und 11-mal so viel wie für die Gewinnung von Stahl.¹⁶ Werden zusätzlich die erheblich höheren Bestandteile energie-intensiver kritischer Metalle in den Motoren und der Steuerungselektronik von Elektroautos berücksichtigt, sind die Werbeslogans von „zero-emission“ besonders bei PS-starken individual-Fahrzeugen fragwürdig.

¹⁴ Bonakdarpour M, Bailey TM (2022) The Future of Copper: Will the looming supply gap short-circuit the energy transition? P. 1-71 with three appendices. Published by S&P Global 2022.

¹⁵ Crooks S, Lindley J, Lipus D, Sellschop R, Smit E, van Zyl S (2023) Bridging the copper supply gap. McKinsey's Metals & Mining Practice.

¹⁶ Haddad AZ, Hackl L, Akuzum B, Pohlman G, J Magnan J-F, Kostecki R (2023) How to make lithium extraction cleaner, faster and cheaper – in six steps. Nature Comment April 2023, Nature 616, 245-248, doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00978-2>.

3 Kritische Metall-Rohstoffe und globaler Klimawandel

3.1 Neue Lagerstätten, Extraktionstechnologien und Substitution

Weltweit, selbst in Deutschland, werden derzeit verstärkt neue Ressourcen für eine zukünftige Gewinnung von Selten Erden Metallen erforscht. Einem möglichen Fund einer neuen oder bei einer bekannten Erz-Lagerstätte folgt die Evaluierung, ob und unter welchen technischen, ökonomischen, geologischen und ökologischen Bedingungen eine Lagerstätte erfolgreich ausgebeutet bzw. erweitert werden kann. Ist eine Ressource positiv als Reserve bewertet, wird die Infrastruktur zum Erzabbau, Aufbereitung und Abtransport eingeleitet. Dies geschieht oft in relativ unzugänglichen und ökologisch sensiblen Regionen der Erde. Der Zeitraum zwischen dem Fund einer Lagerstätte und der Produktion von Rohstoffen beträgt in der Regel ca. 15 bis 20 Jahre. Schnelle Lösungen, rasche Lieferung zur Bedienung des steigenden Rohstoffbedarfs aus neuen Lagerstätten sind also in diesem Zeitraum nicht zu erwarten.

Ein potentiell erheblicher und rascher Anstieg der Metallproduktion wird vermutlich auf neue Extraktionstechnologien unter Nutzung alter Abraumbalden zurückgehen. Vor allem für Kupfer und Kobalt wird schon jetzt ein Verfahren unter Einsatz starker Säuren zum effektiven Auslösen der Metalle genutzt.¹⁷

Auch zielen umfangreiche technologische Forschungen auf die Substitution von Selten Erden Elementen in Hochleistungsmagneten durch andere Elemente. Diese aber bringen vermutlich kurzfristig kaum Dämpfung des Anstiegs des Bedarfs, da nur die besonderen Eigenschaften der SEE die notwendige hohe Effizienz in der technischen Anwendung der Magnete erlauben. Schwächere, aber dafür deutlich größere Magneten z. B. in Windkraftanlagen bedingen erhöhten Einsatz von Beton, Stahl und Aluminium, die ebenso wieder erhöhten Energie-Einsatz erfordern.

Aber auch die Batterie-Technologie macht große Fortschritte. Noch sind Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Akkus zur Stromspeicherung die effizienteste technologische Lösung. An alternativen Speicherlösungen wird intensiv geforscht, und es ist zu erwarten, dass auch neue Technologien in den nächsten Jahren die Marktreife erreichen werden. Für stationäre Stromspeicher können inzwischen (deutlich größere) Na-basierte Stromspeicher den Bedarf an Lithium reduzieren. Auch für Kobalt und Nickel könnten durch andere Metalle zum Beispiel durch leichter zugängliches Mangan ersetzt werden. Die Energiedichte, Sicherheit und Lebensdauer dieser neuen Batterien können aber noch nicht die hohen Anforderungen für die Elektromobilität erfüllen. Die Effizienz derzeitiger E-Motor und

¹⁷ RTR: Roan Tailings Project by Metacol: Reprocessing der Tailings (= Abbau-Rückstände, Minenhalde) aus der gesamten Abbaugeschichte der letzten > 70 Jahre in der DR Kongo (<https://www.ergafrica.com/cobalt-copper-division/metalkol-rtr/>)

Stromspeichertechnologien für eine Elektro-Mobilität mit großen, PS-starken Fahrzeugen und großer Reichweite wird mit den Alternativen nicht erreicht. Die Mobilitätswende kann also nicht nur auf einer Elektrifizierung großer Fahrzeuge beschränkt bleiben, sondern muss in den kommenden Dekaden ganz anders gedacht werden.

Wie für alle anderen kritischen Metalle sind auch für die SEE effizienteren Aufbereitungsmethoden bei der Gewinnung aus bekannten Lagerstätten die derzeit wichtigsten Methoden zur kurzzeitigen Steigerung der Rohstoffproduktion.¹⁸

Versorgungslücken zwischen Bedarf und Förderung von Rohstoffen bleiben also bestehen und dies wird die Weltmarktpreise in den nächsten Dekaden vermutlich stark ansteigen lassen und könnte bei unzureichenden Rohstoffangeboten zu einer Verzögerung und Verteuerung des Ausbaus regenerativer Energien führen.

Sind wir ehrlich: Ob wir mit neuen Technologien die Steigerung der Energieversorgung, einen Individual-Verkehr mit immer mehr und größeren Fahrzeugen und einen weiter steigenden Überkonsum, also alles wie bisher, ermöglichen und sogar CO₂-neutral erreichen können, scheint sehr fraglich.

Sollten wir in Deutschland also tatsächlich entsprechend des Klimaschutzgesetzes bis 2045 unseren Energiebedarf ohne die Freisetzung von CO₂ decken wollen, dann wäre dies nur mit erheblich gesteigertem Rohstoffbedarf und größerer Abhängigkeit von wenigen Lieferländern zu erreichen. Dazu kommt, dass in einigen Lieferländern die Auflagen für sichere Arbeitsbedingungen und zur Vermeidung von Umweltschäden im Bergbau oft nicht eingehalten werden um Kosten zu sparen. Es besteht also die Gefahr, dass eine „saubere“ Elektromobilität und Energieversorgung in Deutschland durch erhöhte Umwelt- und CO₂-Belastungen an anderen Orten der Welt erkaufte wird.

3.2 Recycling hilft *jetzt* nicht weiter!

Natürlich müssen wir jede Anstrengung unternehmen und technologische Lösungen zur Steigerung des Recyclings von kritischen Metallrohstoffen entwickeln. Für Kupfer und Kobalt sind die Recycling-Raten relativ hoch (34 % bzw. 35 %), können aber nur durch neue Technologien und erhöhten Energie-Einsatz und optimierte Materialströme in den Märkten realisiert werden. Dagegen ist Recycling von SEE aus Magneten technologisch und ökonomisch noch nicht praktikabel. Zurzeit werden nur wenige SEE durch Recycling wieder nutzbar gemacht, so wird Nd nur zu 1 % wieder zurückgewonnen.¹⁹

¹⁸ E.g.: Crooks S, Lindley J, Lipus D, Sellschop R, Smit E, van Zyl S (2023) Bridging the copper supply gap. McKinsey's Metals & Mining Practice

¹⁹ Siehe Hilgers et al (2020).

Zudem kann Recycling in einem stark wachsendem Rohstoffbedarf ohnehin im kritischen Zeitraum der nächsten Dekaden keine Lösung bieten. Eine einfache Analyse (und eine umfassende wissenschaftliche Modellierung²⁰) am Beispiel von Lithium, zeigen, dass jetzt Recycling keine Lösung im Kampf gegen den Klimawandel sein kann. Auf der Basis einer abgeschätzten Zuwachsrate der Lithium-Produktion von heute (2020 130 kt Li/Jahr auf über 1.300 kt/Jahr in 2050²¹), der Einsatzdauer von Autobatterien (15 Jahre) und einer optimistischen Annahme einer hohen Recyclingrate von 80 % zeigt sich, dass eine Kreislaufwirtschaft für Lithium frühestens im Jahr 2070 erreicht werden kann. Der Grund hierfür ist, dass ein rasant steigender Bedarf selbst bei 100 % Recyclingrate vorhandener Wertstoffe nicht annähernd gedeckt werden kann. Da die kritischen Metalle aber jetzt verstärkt gebraucht werden, können die Versorgungslücken nicht durch Recycling gedeckt werden.

Dieser Befund widerspricht auch der Vorstellung einer Kreislaufwirtschaft, in der jeglicher Bedarf an Gütern und Materialien durch Rückführung in einen Wirtschafts- und Nutzungskreislauf gedeckt werden könnten. Zum einen sind selbst im Idealfall Recyclingraten von 100 % grundsätzlich nicht erreichbar, zum anderen ist eine Kreislaufwirtschaft letztlich ein statisches System, dass der immer dynamisch agierenden Menschheit nicht gerecht wird.

3.3 Warum *wir* jetzt handeln müssen

Diese Analyse der Rohstoff-Situation der kritischen Metalle für eine Energie- und Mobilitätswende zeigt eindeutig, dass zum einen erhebliche Anstrengungen und stark gesteigerter Energieeinsatz notwendig sein werden, um die erforderlichen Rohstoffe für neue Technologien und Steigerung vorhandener Maßnahmen zu ermöglichen und den CO₂-Ausstoß in Deutschland zu reduzieren. Zum anderen zeigt sich, dass Umweltschädigung, gesteigerter Ressourcen- und Energieverbrauch in andere Regionen der Welt „exportiert“ werden, um uns mit „sauberer“ Energie und Elektromobilität zu versorgen, die nicht wirklich CO₂-neutral sein können. Aber Nichthandeln mit dem Verweis auf Umweltschäden durch den Abbau von kritischen Metallrohstoffen ist auch keine Option, dazu sind die Ursachen und Folgen des Klimawandels zu eindeutig. Auch der Verweis darauf, dass Deutschland nur 2 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes zu verantworten hat, kann nicht dazu führen, nicht zu handeln. Bei einer genaueren und ehrlicheren Betrachtung zeigt sich, dass Deutschland sehr wohl eine große Verantwortung trägt. Man muss den gesamten Zeitraum der Industrialisierung, die vor allem in den westlichen Ländern ihren Anfang genommen hat, und den „importierten“ CO₂-Ausstoß durch Import-

²⁰ Wesselkämper et al (2023) A battery value chain independent of primary raw materials: Towards circularity in China, Europe and the US. Resources, Conservation and Recycling, Volume 201, February 2024, 107218.

²¹ Bonakdarpour M, Bailey TM (2022).

te, Entwaldung, Massenproduktion und Rohstoff-Abbau berücksichtigen, der in anderen Regionen der Erde stattfindet, aber unsere Produktion stützt und Konsum befriedigt. Werden die CO₂-Freisetzungen aus der Verbrennung fossiler Energierohstoffe über die Zeit von 1850 bis heute akkumuliert, dann liegt Deutschland (ohne die „Exporte“ in andere Regionen der Welt zu berücksichtigen) hinter den USA, China und Russland auf dem dritten Platz.²² Daraus ergibt sich heute die Verantwortung, jegliche Anstrengungen zu unternehmen, einer weiteren, ungebremsten Emission von CO₂ entgegenzutreten.

Trotzdem bleibt, wie die ICCP-Berichte und der Generaldirektor der UN, Guterres, deutlich machen, eine globale Aufgabe, einen weitergehenden Klimawandel zu verhindern. Die extremen Szenarien des ICCP-Reports²³ für die Erderwärmung bis 2100 liegen zwischen + 5 °C (weiterer Anstieg der CO₂-Emissionen) und + 1,5 °C (keine netto CO₂-Emissionen mehr ab 2050). Da wir schon jetzt die durch die Regierungen beschlossene CO₂-Reduktion (Pariser Klimakonferenz der UN, COP15) nicht erreichen, befinden wir uns auf einem Entwicklungspfad, der bis zum Jahr 2100 zu einer Erwärmung um mehr als 3 °C führen wird. Wir haben zwei Handlungsoptionen: Wenn wir die globalen CO₂-Emissionen in den nächsten 25 Jahren auf null reduzieren wollen (Paris-Ziel + 1,5 °C), müssen Wirtschaft, Energieproduktion, Mobilität, Konsum und Ernährung vollständig umgebaut bzw. geändert werden. Selbst dann müssen wir mit – moderaten – globalen Klimaschäden rechnen. Allerdings müssten die notwendigen Maßnahmen ab sofort und innerhalb von wenigen Jahrzehnten vollständig wirksam sein. Damit sind ein massiver Ausbau der Atomkraft zur vollständigen Versorgung der Menschheit mit elektrischer Energie oder die Erzeugung von Strom durch Fusion und andere Zukunftstechnologien keine Lösung, weil diese Technologien nicht so schnell und weltweit einsetzbar wären wie nötig. Die Frage der immensen Kosten und der intrinsischen Gefährdung durch diese Technologien ist dabei noch nicht berücksichtigt.

Wenn wir aber die erforderliche Reduzierung der Treibhausgas-Emissionen nicht erreichen können, dann werden wir die Folgen einer dramatischen Erderwärmung akzeptieren und große Schäden und Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels finanzieren müssen.

²² Evans S (2021) Which countries are historically responsible for climate change? Source: Source: Carbon Brief analysis of figures from the Global Carbon Project, CDIAC, Our World in Data, Carbon Monitor, Houghton and Nassikas (2017) and Hansis et al (2015).

²³ ICCP AR6 Synthesis Report 2023. Siehe auch: Climate Action Tracker (2023). 2100 Warming Projections: Emissions and expected warming based on pledges and current policies. December 2023. Available at: <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>.

3.4 Konsequenzen und Handlungsoptionen

Hoffnung und wirkungsvolle Handlungsoptionen sind vielfältig. Die Energie der Sonneneinstrahlung in einer Stunde entspricht dem Energieverbrauch der Menschheit innerhalb eines Jahres. Diese Energie-Menge kann natürlich nicht einfach gewonnen und vollständig genutzt werden. Dennoch zeigt dies, dass die Sonne in Verbindung mit der Wasserstoff-Technologie mit Sicherheit eine entscheidende Rolle für die Energieversorgung der Menschheit in der Zukunft. Das wird aber neue Abhängigkeiten zu den Staaten des globalen Südens zur Folge haben, denn nur dort wird die Sonnenenergie in ausreichendem Maße verfügbar sein. Der dazu gehörige Ausbau der Infrastruktur zum Transport des Wasserstoffs, entweder in Pipelines oder per Schiff in Form von Ammoniak ist ebenfalls eine Mammutaufgabe. Da Industrie, Mobilität und Rohstoffabbau-Aktivitäten und andere menschliche Aktivitäten nicht vollständig ohne CO₂-Emissionen möglich sein werden, kommt den „negativen“ Emissionen, also der unterirdischen Speicherung von CO₂ in der Erdkruste eine wachsende Rolle zu. Diese sog. „*Carbon Capture and Storage*“ (CCS) Technologien werden zurzeit, vor allem in Norwegen, im großen Industriellen Stil praktiziert und auf Island gibt es Pilotanlagen zum CCS. Diese Technologie darf aber nicht dazu verleiten, fossile Energie-Rohstoffe weiter wie bisher zu nutzen und auf diese Art der Kompensation zu hoffen.

Die Weltgemeinschaft wird sich neue Regeln geben müssen und „Homo Sapiens“ wird zwei Probleme zu lösen haben: 1. Die Überbevölkerung unseres Planeten sollte reduziert werden, denn der – vor allem bei global steigendem Wohlstand – exponentiell steigende Energie- und Rohstoffbedarf wird in der Zukunft nicht mehr gesichert werden können. 2. Der Überkonsum in den reichen Ländern, in denen wenige Menschen maximale CO₂-Emissionen zu verantworten haben, wird reduziert werden müssen. Vor allem im Hinblick auf diesen Überkonsum haben wir in den reichen industrialisierten Ländern der Erde eine besondere Verantwortung. Wir sollten für uns neue Formen und Kriterien für Wohlstand und Reichtum erlernen und „Verzicht“ als positive Lebenshaltung gewinnen.

Auch als Individuen können alle einen Beitrag leisten. Aber eine Individualisierung der Problemlösung ist kein Ausweg. Regierungen und Parteien müssen beginnen, sich und uns ehrlich zu machen. Dazu müssen wirksame Regeln beschlossen und wirksame politische Vorgaben durchgesetzt werden, die den Ausbau regenerativer Energieproduktion weltweit fördert und den Verbrauch fossiler Energieformen auf ein Minimum senken. Technologische Alternativen sollten nur dann gefördert werden, wenn sie diesen Zielen dienen. Eine weltweit drastisch ansteigende Rohstoffförderung wird notwendig sein, die aber Menschen und Umwelt schonen muss. CO₂-Speicher-Technologien (CCS) müssen ausgebaut werden, da eine vollständige Vermeidung von CO₂-Emissionen nicht verhindert werden kann. Dies wird zu unvermeidbaren Eingriffen in Natur und Umwelt und zu Widerständen in der Bevölkerung führen. Dies ist der Preis einer technisierten Zivilisi-

sation, zu der wir keine Alternative entwickelt haben. Wie wir in den nächsten 100 oder 500 Jahren leben und unsere Welt gestalten werden wird sich in den nächsten Dekaden entscheiden. Die in den Ozeanen und der Atmosphäre akkumulierten hohen CO_2 -Gehalte werden die Temperaturen auf der Erde noch für Jahrhunderte beeinflussen und die nächste Eiszeit wird sich vermutlich um Jahrtausende verspäten. Die Physik der Atmosphäre, die Folgen des Klimawandels und die beschränkten natürlichen Ressourcen unseres Planeten lassen sich nicht durch politische Ideologien oder angebliche ökonomische Zwänge wegdiskutieren.

Innerhalb der nächsten 100 Jahre wird es, so oder so, fundamentale Änderungen im Leben der Menschheit geben. Die Befunde der Geowissenschaften zur Geschichte unserer Erde und der biologischen Evolution über viele Millionen von Jahren sagen uns allerdings, dass das Leben der Erde im Klimawandel nicht ausstirbt. Die Zivilisation der Menschheit, so wie wir sie kennen, ist allerdings in Gefahr.

Offshore Megastrukturen: Zukünftige Energieversorgung durch Windenergieanlagen neuer Dimension

ANDREAS EHRMANN ^{*, b}
und RAIMUND ROLFES ^{*, a, b}

* Leibniz Universität Hannover

^a Institut für Statik und Dynamik

^b ForWind – Zentrum für Windenergieforschung

I. Welche Ziele hat die Energiewende?

Angesichts der Herausforderungen durch den menschengemachten Klimawandel und aus der geopolitisch bedingten Volatilität der fossilen Energieverfügbarkeit werden auf nationaler und internationaler Ebene große Anstrengungen zur Dekarbonisierung der Energieerzeugung und zur europäischen Vernetzung der Versorgungssicherheit unternommen. Im Rahmen der deutschen Energiewende und des Green Deal der Kommission der Europäischen Union (2019) soll ein wesentlicher Anteil der zukünftigen Stromversorgung durch die Windenergie abgedeckt werden, insbesondere durch auf See (offshore) erzeugten Strom.

Im Hinblick auf das von der EU-Kommission im Jahr 2019 vorgestellte Konzept zur Reduktion der Treibhausgase auf null bis zum Jahr 2050 („European Green Deal“), kommt der Offshore-Windenergie eine zentrale Bedeutung zu. Nur durch den Einsatz großflächiger Windparks mit größeren Turbinen können die Ziele erreicht werden. Neben der Stromgewinnung kann dabei durch Wasserstoff-Elektrolyse direkt an der Windkraftanlage auch ohne Netzanbindung Grüner Wasserstoff zur Energieversorgung gewonnen werden. Gemäß der Ostende-Deklaration der Nordsee-Anrainerstaaten (2023) soll bis 2050 in der Nordsee das „weltgrößte Grünstromkraftwerk“ mit 300 GW installierter Leistung entstehen.

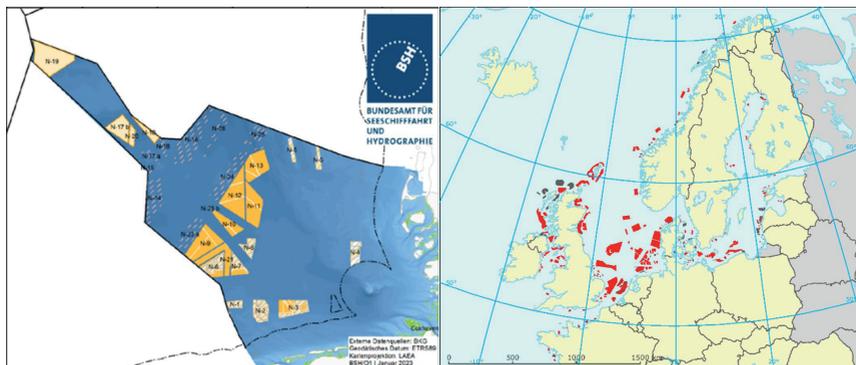


Abb. 1: links: Geplanter Ausbau der Offshore-Windenergie in der deutschen Nordsee (Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 2023), rechts: maximaler Ausbau in Nordeuropa (Quelle: European Environment Agency, 2022).

Regenerative Energien in Deutschland haben heute schon eine große Bedeutung für die Stromversorgung. Im Jahr 2023 wurden bereits 56 Prozent der Nettostromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern insgesamt – und 31 Prozent aus Windkraft geleistet (Statistisches Bundesamt), davon etwa ein Sechstel offshore (Fraunhofer ISE). Die politischen Zielvorgaben für Deutschland bedeuten eine Steigerung der derzeit etwas über 8 GW installierten Leistung offshore (Stand 2023) auf 30 GW in 2030 und 70 GW in 2045.

II. Was sind (Offshore-)Windenergieanlagen?

Windenergieanlagen sind Maschinen, die die kinetische Energie des Windes in elektrische Energie umwandeln. Eine typische Windenergieanlage besteht aus mehreren Hauptkomponenten: Rotorblätter, Nabe, Gondel, Generator, Turm und Fundament. Die aerodynamisch geformten Rotorblätter fangen den Wind ein und setzen die kinetische Energie des Windes in Drehbewegung um. Moderne Windturbinen haben aufgrund des höheren Wirkungsgrades drei Rotorblätter. Die Rotorblätter sind an der Nabe befestigt, die wiederum auf einer Hauptwelle montiert ist. Die Gondel, eine Gehäusekonstruktion, sitzt auf dem Turm der Anlage und beherbergt die Hauptwelle, den Generator, das Getriebe und weitere wichtige Komponenten. Durch die Drehung der Hauptwelle wird im Generator elektrische Energie erzeugt. Der Turm trägt die Gondel und die Rotorblätter in größerer Höhe, wo der Wind stärker und beständiger ist. Das Fundament verankert die Anlage sicher im Boden oder auf dem Meeresgrund bei Offshore-Windparks.

Onshore-Windenergieanlagen befinden sich an Land und sind weit verbreitet. Sie bieten eine kosteneffiziente Möglichkeit zur Nutzung von Windenergie, insbesondere in windreichen Regionen. Es gibt jedoch auch Herausforderungen. Die Energieproduktion hängt von der Windverfügbarkeit ab, die schwanken kann. Windenergieanlagen können lokale Umweltbelastungen verursachen, etwa durch Lärm oder visuelle Beeinträchtigung und Einfluss auf die Vogelwelt. Geeignete Standorte müssen sorgfältig ausgewählt werden, um maximale Effizienz zu gewährleisten und Konflikte mit anderen Nutzungen zu vermeiden.

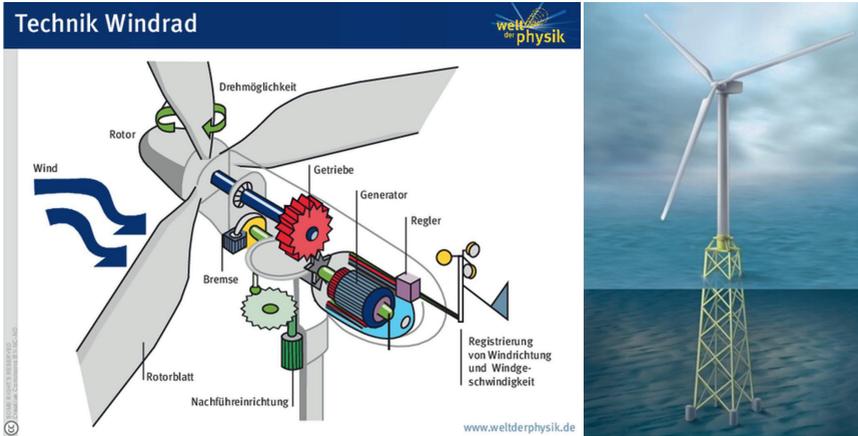


Abb. 2: links: Aufbau einer Windturbinen-Nabe (Quelle: Welt der Physik), rechts: Offshore-Windenergieanlage mit Turm und im Meeresboden verankerter Jacket-Tragstruktur (Quelle: Bjarne Stenberg, NTNU, Norway).

Offshore-Windenergieanlagen befinden sich im Meer und nutzen die dort höheren und beständigeren Windgeschwindigkeiten. Bei fest gegründeten Offshore-Anlagen ist die Tragstruktur jedoch weit aufwendiger als an Land – zum Turm kommen die Gründungsstruktur sowie die Verankerung im Meeresboden hinzu. Bei weiterem Größenwachstum der Anlagen werden neue Bauweisen, Materialien, Fertigungs- und Gründungskonzepte sowie Entwurfssystematiken für Offshore-Parks erforderlich sein. Dabei ist es ein übergeordnetes Ziel, die mechanischen und elektrischen Komponenten der Offshore-Anlagen hinsichtlich ihrer Extrem- und Ermüdungsbeanspruchung zu optimieren und gleichzeitig ihre Zuverlässigkeit zu erhöhen. Die Weiterentwicklung der Tragstrukturkomponenten spielt hierbei ebenso eine wichtige Rolle wie auch der mechanischen Komponenten der Turbine wie Triebstrang oder Wälzlager. Auch die Rotorblätter, die heute überwiegend aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) bestehen, haben einen großen Innovationsbedarf.

III. Warum sprechen wir von Offshore Megastrukturen?

Um den benötigten Ausbau der Stromerzeugungskapazitäten zu realisieren, sind größere und leistungsstärkere Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) notwendig als die aktuell errichteten. Solche Offshore Megastrukturen sind effizienter bei der Stromerzeugung und somit wirtschaftlicher als heutige kleinere Anlagen, sodass die Entwicklung bereits seit vielen Jahren in Richtung größerer Anlagen geht. Lagen noch vor dreißig Jahren typische Turbinenleistungen von Windenergieanlagen an Land (onshore) bei 0,6 MW und einem Rotordurchmesser von 40 Meter, so sind diese Werte beim 2023 installierten Prototypen einer Offshore-Anlage von Dongfang Electric Corporation (China) auf 18 MW und 260 Meter angewachsen. Der Zukunftstrend zeigt in Richtung noch größerer Anlagen mit 20 bis 30 MW Leistung und darüber hinaus. Die heutigen Entwurfswerkzeuge und Konstruktionsprinzipien nähern sich allerdings bereits den Grenzen ihrer Möglichkeiten, sodass der technischen wie wirtschaftlichen Realisierung zukünftiger, noch deutlich größerer Anlagen zurzeit noch unbeantwortete Fragen hinsichtlich Auslegungsrandbedingungen, Entwurfsprinzipien, Regelung und Strukturüberwachung gegenüberstehen.

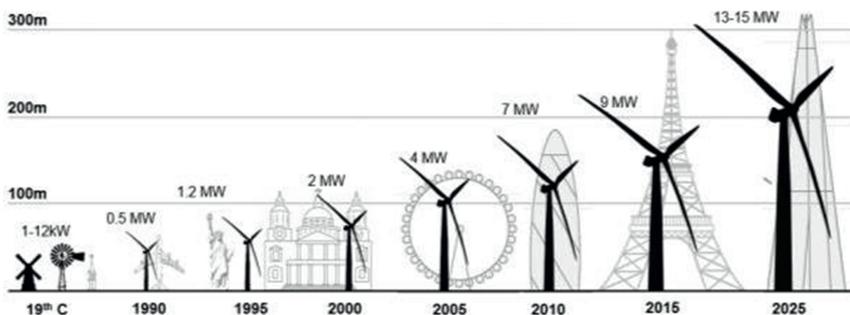


Abb. 3: Technologische Entwicklung der größten Windenergieanlagen (Quelle: Bloomberg New Energy Finance, 2019).

Die Auslegung der sehr großen Anlagen kann immer weniger nach Bauteilen getrennt erfolgen, da kritische strukturdynamische Interaktionen auszuschließen sind. Sie erfordern gekoppelte nichtlineare, transiente aero-servo-hydro-elastische Analysen. Aufgrund der schweren Zugänglichkeit von Offshore-Anlagen besteht zudem ein hoher Bedarf an weitgehend automatisierten Schadensfrüherkennungssystemen für Tragstruktur und Blätter, beispielsweise basierend auf Methoden des maschinellen Lernens. Die Verbesserung der Leistungselektronik und die Entwicklung intelligenter Regelungssysteme für das einzelne Rotorblatt,

die Turbine und den vernetzten Windpark zur Anpassung an die aktuelle Windsituation, ist ein weiteres Ziel. Mit Hilfe von Big Data Analytics und künstlicher Intelligenz können nicht nur einzelne Offshore-Windparks wirtschaftlich geplant werden, sondern es lässt sich das gesamte Energiesystem samt Netzanbindung modellieren und effizient ausgestalten.

IV. Was sind die Ziele im Sonderforschungsbereich 1463?

Der seit seinem Projektstart im Januar 2021 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Sonderforschungsbereich SFB 1463 Offshore Megastrukturen adressiert die Herausforderungen an ein weiteres Größenwachstum von Windenergieanlagen auf See. Unter der Projektleitung von Prof. Raimund Rolfes (Institut für Statik und Dynamik an der Leibniz Universität Hannover) arbeiten Forscher standortübergreifend und multidisziplinär zusammen, darunter mehrere Mitglieder von ForWind – dem gemeinsamen Zentrum für Windenergieforschung der Universitäten Oldenburg, Hannover und Bremen. Die physikalischen, konzeptionellen und methodischen Grundlagen für die integrierte Entwurfs- und Betriebsmethodik zukünftiger Offshore-Windenergieanlagen werden in Teilprojekten untersucht und anhand des „Digitalen Zwillings“ – eines über alle Lebensphasen der Anlage hinweg lernenden digitalen Abbilds einer Offshore-Windenergieanlage – zusammengeführt. Die Herangehensweise im Projekt ist modular und gleichzeitig miteinander vernetzt und betrachtet dabei ganzheitlich Entwurf, Installation, Betrieb und Rückbau der Megastruktur. Die Vision des SFB 1463 ist es, mithilfe des Konzepts des Digitalen Zwillings eine integrierte Entwurfs- und Betriebsmethodik für Offshore Megastrukturen zu entwickeln und an einem Demonstrationsbeispiel einer Offshore-Windenergieanlage mit einer Leistung von mehr als 20 MW mit Fokus auf Tragstruktur und Rotorblätter umzusetzen.

In der ersten Förderperiode des SFB (2021–2024) liegt der Fokus auf der Konzept- und Methodenentwicklung und dem Entwurf der großen Strukturkomponenten und relevanter Kopplungseffekte. Die umfassende Verifizierung und Validierung dieser Methoden soll in der zweiten Förderperiode (2025–2028) erfolgen.



Abb. 4: links: Versuchskörper der Jacket-Tragstruktur einer 20+ MW-Offshore-Windenergieanlage zur experimentellen Analyse der Seegangbelastung im Großen Wellenströmungskanal Hannover, rechts: Modellwindenergieanlage zur Untersuchung neuartiger Rotorblätter im Windkanal des WindLab Oldenburg.

Verbrennung im Kontext von Klima und Energiewende

KATHARINA KOHSE-HÖINGHAUS

Physikalische Chemie I, Universität Bielefeld, Universitätsstraße 25,
33615 Bielefeld

Kurzfassung des Vortrags im phæno am 29. November 2023

Warum sollte man sich angesichts der Energiewende und der Klimafolgen von Verbrennungsprozessen noch mit Verbrennungsforschung befassen? Noch immer stammen allerdings etwa 80% der weltweit genutzten Primärenergie aus fossilen Quellen. Zweifellos müssen Emissionen von Klimagasen und Schadstoffen aus der Verbrennung dringend reduziert werden. Verkehr, Energiewirtschaft, Bereitstellung von Wärme und industriellen Prozessen erfordern allerdings unterschiedliche Lösungen. Der Vortrag hatte zum Ziel, anhand aktueller Forschungsfragen zur Diskussion anzuregen. Dabei wurden alternative Brennstoffe (wie Wasserstoff, Ammoniak, Ether, nachhaltige Flugtreibstoffe, Metalle), die Speicherung und Kombination mit erneuerbarer Energie sowie neuartige Prozesse (Plasma, Pyrolyse, Materialerzeugung) beispielhaft vorgestellt. Zudem ist die Vermeidung, Erkennung und Bekämpfung von Feuern, die auch angesichts des Klimawandels an Intensität und Häufigkeit zunehmen, Gegenstand der Verbrennungsforschung.

Weiterführende Literatur:

K. Kohse-Höinghaus, Combustion, chemistry, and carbon neutrality, *Chemical Reviews* **123**, 5139–5219 (2023)

Energiewende aus der Sicht der elektrischen Energieversorgung

ERNST GOCKENBACH

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

1 Einleitung

Der Begriff der Energiewende wird an vielen Stellen verwendet und beschreibt allgemein den Übergang von einer nicht-nachhaltigen Nutzung fossiler Energieträger und der Kernenergie zu einer nachhaltigen Energieversorgung mittels erneuerbarer Energien. Die Energiewende ist entscheidend für eine sichere, umweltverträgliche und wirtschaftlich erfolgreiche Zukunft, da der Wohlstand unserer Gesellschaft von einer funktionierenden Energieversorgung abhängt. Ohne Strom, Wärme und Mobilität ist unser Alltag nicht mehr denkbar. Dazu ist es erforderlich, dass alle Sektoren Strom, Wärme, Gebäude, Verkehr und Industrie zusammen betrachtet werden, um deren gesamten Energiebedarf zu optimieren. Elektrische Energie, häufig auch unter dem Stichwort Strom, kann und wird in vielen Bereichen eingesetzt, angefangen von der elektrischen Energieversorgung im Haushalt für Licht, Kühlschrank und Herd, bis hin zur industriellen Nutzung für Maschinen oder Rechenzentren für das Internet. Abbildung 1 zeigt anschaulich die Möglichkeiten der Sektorenkopplung.¹



Abb. 1. Sektorenkopplung.

Im Folgenden wird nur der Sektor Strom mit dem Begriff elektrische Energieversorgung behandelt, da die Bereitstellung der elektrischen Energie durch regenerative Energiequellen und die daraus entstehenden Folgeprodukte wie z. B. Wasserstoff den wesentlichen Beitrag zur Energiewende liefern.

¹ EMCEL GmbH, 16.11.2020, Link der Frage des Monats – Definition Sektorenkopplung: Worum geht es?

2 Grundlagen der elektrischen Energieversorgung

Die elektrische Energieversorgung kann nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden. Die Erzeugung der elektrischen Energie, die vereinfachte Bezeichnung für die Bereitstellung elektrischer Energie, erfolgte in der Vergangenheit in großen Kraftwerken, die mit Steinkohle, Braunkohle, Kernkraft, Öl oder Gas betrieben wurden. Die Übertragung erfolgte über Hochspannungsfreileitungen oder Hochspannungskabel durch die Übertragungsnetzbetreiber. Danach erfolgte die weitere Verteilung der elektrischen Energie durch Verteilnetze der Regionalnetzbetreiber, ebenfalls noch mit Hochspannung, um dann über Verteiltransformatoren die einzelnen Kunden, z. B. Haushalte, mit elektrischer Energie bei Niederspannung zu versorgen. Ein anderes Kriterium der elektrischen Energieversorgung sind die verschiedenen Spannungsebenen, 400 kV oder 220 kV für die Übertragung, 110 kV für die Verteilung und 400/230 V für die Versorgung der Kunden. Die Bereitstellung erfolgte im Allgemeinen in den Bereichen, in denen die elektrische Energie benötigt wurde. Die Übertragungsleitungen dienten zur Verbindung mit benachbarten Staaten und zum Ausgleich des Energiebedarfes z. B. im Fall eines Ausfalls eines großen Kraftwerkes. Diese Situation wird in der Energietechnik mit n-1 beschrieben und bedeutet, dass beim Ausfall einer großen Netzkomponente (Kraftwerk oder Übertragungsleitung) die elektrische Energieversorgung unverändert gewährleistet sein muss. Ein Bewertungsmaßstab ist die Zeit ohne elektrische Energieversorgung, die in Deutschland im Jahre 2022 gemäß den Angaben der Bundesnetzagentur 12,2 Minuten je Letztverbraucher betrug.² Damit belegte Deutschland einen der Spitzenplätze in Europa und auch weltweit. Neben dem sehr großen Vorteil der elektrischen Energieversorgung, einfacher Transport und Verfügbarkeit praktisch an jedem Ort, ist der nicht unerhebliche Nachteil, dass elektrische Energie nicht einfach speicherbar ist.

3 Zukünftige Energieversorgung

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)³ wird die bevorzugte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ins Stromnetz geregelt. Zu diesen Quellen zählen Wasserkraft, Windenergie, solare Strahlungsenergie (Photovoltaik), Geothermie und Energie aus Biomasse. In Deutschland sind vor allem Windenergie und Photovoltaik Energiequellen, die zunehmend für die elektrische Energieversorgung nutzbar sind, um die im EEG beschriebenen Ziele zu erreichen:

² Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Kennzahlen der Versorgungsunterbrechungen Strom.

³ EEG – Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, Bundesrepublik Deutschland.

Bis 2030 sollen mindestens 80 Prozent des Bruttostromverbrauchs aus Erneuerbaren Energien gedeckt werden. Zum Bruttostromverbrauch zählt der gesamte Stromverbrauch aller Endverbraucher, also der Haushalte, Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen – abzüglich der Umwandlungs- und Netzverluste.

Beispielhaft sind in Abb. 2 die verschiedenen Energieträger für die beiden ersten Halbjahre 2022 und 2023 dargestellt.

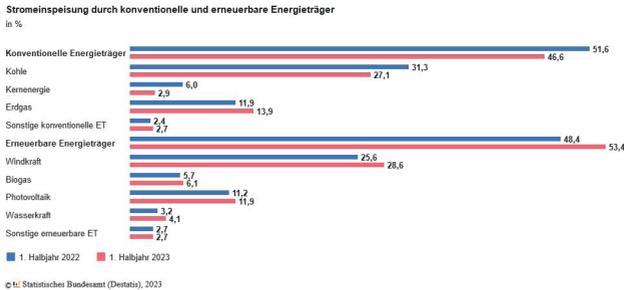


Abb. 2. Vergleich der Energieträger in 2022 und 2023⁴

Der Anteil der jeweiligen Energieträger bezieht sich auf die gesamte Strommenge, identisch mit der gesamten elektrischen Energie. Trotz einer Abnahme der gesamten elektrischen Energie im ersten Halbjahr 2023 gegenüber dem ersten Halbjahr 2022 war eine Zunahme der aus Windkraft gewonnenen Energie von 25,6% auf 28,6% zu verzeichnen. Der nächst größere Lieferant elektrischer Energie war die Photovoltaik, bei der eine Zunahme im ersten Halbjahr 2023 von 11,9% zu erkennen ist.

3.1 Ziele der Energiewende

Die Ziele der Energiewende sind allerdings sehr anspruchsvoll. Abb. 3 zeigt den Endenergieverbrauch nach Sektoren und die Erwartungen in 2030 und 2045. Vom Stand 2368 TWh im Jahr 2022 soll der Endenergieverbrauch um 21% im Jahr 2030 und um 41% im Jahr 2045 vermindert werden. In Abb. 3 ist jedoch keine Aussage darüber enthalten, in welchem Sektor diese hohe Minderung des Endenergieverbrauchs erzielt werden soll.

⁴ Statistisches Bundesamt.

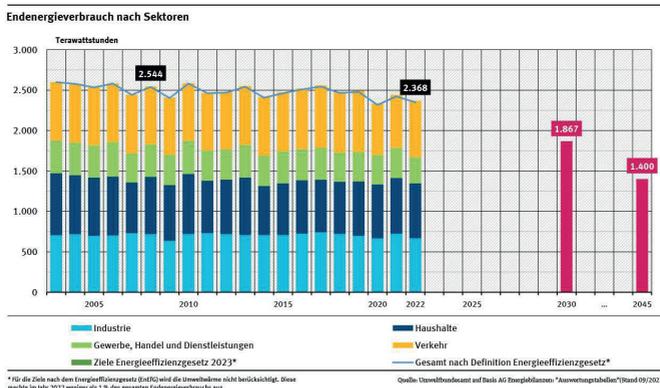


Abb. 3. Endenergieverbrauch nach Sektoren mit angestrebten Zielen⁵

3.2 Wandel der elektrischen Energieversorgung

In Abb. 4 ist der Wandel in der elektrischen Energieversorgung bildlich vereinfacht dargestellt. Die bisherige Struktur der elektrischen Energieversorgung kann sehr gut mit „hierarchisch“ bezeichnet werden (linke Seite Abb. 4), da der Energiefluss vom Kraftwerk über die verschiedenen Hochspannungsebenen zu den Verbrauchern erfolgte. In der zukünftigen dezentralen elektrischen Energieversorgung (rechte Seite Abb. 4) wird der Begriff „demokratisch“ verwendet, weil die Bereitstellung der elektrischen Energie in allen Spannungsebenen von den unterschiedlichsten Anlagen erfolgen kann.

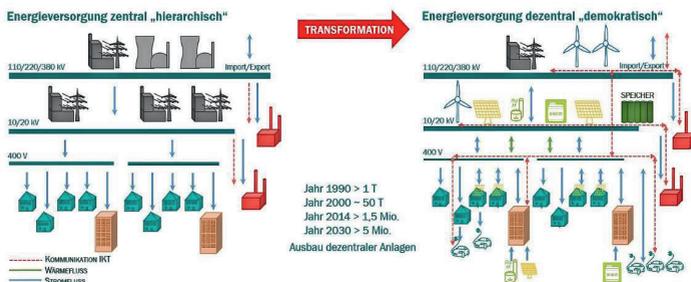


Abb. 4 Transformation der elektrischen Energieversorgung⁶

Bei dieser Transformation sind einige Änderungen bezüglich der Versorgungssicherheit mit elektrischer Energie zu beachten. Das elektrische Energiesystem benötigt ein ständiges Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Im

⁵ Umweltbundesamt – Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren.

⁶ RRI – Zentrale wissenschaftliche Einrichtung an der Hochschule Reutlingen.

hierarchischen System waren große Massen in den Generatoren vorhanden, die mit ihrer Trägheit einen Beitrag zur Stabilität durch ihre Momentanreserve liefern konnten. Diese Massen stehen mit der Reduzierung der thermischen Kraftwerke nicht mehr zur Verfügung und das Netz muss über andere Maßnahmen stabilisiert werden. Die Netzregelung ist durch die erhöhte Zahl der Energieerzeuger in allen Spannungsebenen sehr viel komplexer geworden und erfordert an vielen Stellen die Erfassung der aktuellen Daten.

3.3 Volatilität der erneuerbaren Energiequellen

Die größte Herausforderung stellt aber die hohe Volatilität der Energiequellen Wind und Sonne dar. Der Extremfall ist dabei die sogenannte „Dunkelflaute“, das heißt wenn nachts auch noch kein Wind weht. Aber Situationen, wo wenig Wind und wenig Sonne vorhanden sind, treten häufig ein und dafür sind Energiespeicher notwendig, die Regelleistung im Sekunden- bis Minutenbereich (Primärregelung), im Minutenbereich (Sekundärregelung) und im Stundenbereich (Tertiärregelung oder Minutenreserve) zur Verfügung stellen können. Die Süddeutsche Zeitung vom 2. Februar 2021 berichtete, dass im Zeitraum zwischen dem Vormittag des 6. Januar und dem Morgen des 10. Januar die Windenergie Onshore und Offshore zusammen mit der Photovoltaik nur 10 Gigawatt Leistung zur Verfügung stellte, während der Bedarf in diesen Stunden aber zwischen 51 und 74 Gigawatt lag.

Bei den Leistungsangaben der erneuerbaren Energiequellen Wind und Sonne ist zu beachten, dass in der Regel die Leistung und die auf ein Jahr bezogene Energiemenge genannt werden. Folgende Volllaststunden pro Jahr werden angenommen: Kernkraftwerk 8000 h – Kohlekraftwerk 5000 h – Windkraft offshore 4500 h – Windkraft Onshore 3500 h – Photovoltaik 2300 h. Diese Angaben sind aber zusätzlich mit der Betriebsart zu bewerten. Ein Kohlekraftwerk mit 5000 Volllaststunden ist in etwa mit einer Windkraftanlage offshore zu vergleichen, aber das Kohlekraftwerk kann seine Leistung im großen Umfang regeln, die Windkraftanlage ist nur in Richtung Leistungsminderung regelbar und das auch nur, wenn Wind vorhanden ist. Eine Vervielfachung der Leistung durch erhöhte Anzahl von Anlagen löst das Problem nicht, denn wenn kein Wind weht, stehen alle Anlagen, unabhängig von der Anzahl der Anlagen still. Die gleiche Problematik liegt bei Photovoltaikanlagen vor, wenn es dunkel ist, liefern alle Photovoltaikanlagen keinen Strom.

3.4 Elektroauto

Bei den E-Autos ist zu beachten, dass die Aufladung nicht zum gleichen Zeitpunkt in einem Gebiet erfolgt. Das muss durch eine intelligente Steuerung der Ladestationen geregelt werden. Die Nutzung der Batterien in den E-Autos als elektrische Energiespeicher ist möglich, wenn die Ladeinrichtung am Netz und im E-Auto ein sogenanntes bidirektionales Laden ermöglichen. Zurzeit sind aber nur einige E-Autos für einen solchen Betrieb vorbereitet.

Die Netzstruktur in den Verteilnetzen ist an vielen Stellen nicht für eine große Zunahme der Leistung ausgelegt. Das kann sowohl die Bereitstellung der Leistung durch eine Vielzahl von Photovoltaikanlagen bedeuten als auch eine Zunahme von E-Autos für deren Ladeleitung das Netz nicht ausreicht. Zusätzlich müssen im Niederspannungsnetz die zulässigen Spannungsgrenzen von $\pm 10\%$ vom Nominalwert eingehalten werden, was zum Einsatz eines regelbaren Ortsnetztransformators führen kann.

3.5 Übertragungsnetze

Die bisherigen Übertragungsnetze dienen dem Leistungsausgleich innerhalb Deutschlands und den Verbindungen zu unseren europäischen Partnern. Zudem befanden sich die Erzeugungsanlagen im Allgemeinen im Bereich der Energieanwender. Der Einsatz der regenerativen Energiequellen Wind und Sonne erfordert aber eine leistungsstarke Verbindung zwischen den Erzeugungsanlagen und den Verbrauchern, da in der Regel die besten Bedingungen für die Erzeugung der elektrischen Energie sich nicht im gleichen Gebiet wie die Verbraucher befinden. Abb. 5 zeigt beispielhaft die Verteilung der Windkraftanlagen in Deutschland. Die dargestellten Daten stammen aus den Veröffentlichungen entspr. § 15 Abs. 2 EEG der Übertragungsnetzbetreiber Tennet TSO, 50Hertz Transmission, Amprion, TransnetBW. Die überwiegende Zahl der Anlagen befindet sich im Norden Deutschlands, wobei insbesondere die Küstengebiete an der deutschen Nordsee zu beachten sind. Da aber in Norddeutschland weniger Industrie vorhanden ist und die Kernkraftwerke in Deutschland abgeschaltet wurde, besteht ein sehr hoher Bedarf an Übertragungsleistung von Nord nach Süd. Diese Übertragungssysteme sind in der Planung und im Bau und werden aufgrund politischer Entscheidungen als Hochspannungskabel ausgeführt.⁷ Abb. 6 zeigt die verschiedenen Kabelstrecken, von denen eine vom Raum Hamburg bis in den Raum Stuttgart mit einer Länge von etwa 700 km führt bei einer Übertragungsleistung von 4 GW. Dieses Projekt trägt den Namen SuedLink und ist für eine Betriebsspannung von 525 kV vorgesehen.

⁷ Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) § 3 – Erdkabel für Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung.

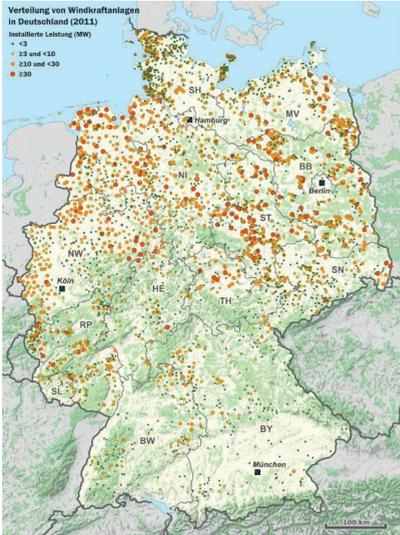


Abb. 5. Verteilung der Windkraftanlagen in Deutschland.⁸



Abb. 6. Geplante und im Bau befindliche Hochspannungsleichstromkabel.⁹

3.6 Gesetzliche Maßnahmen

- Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)

Zweck des Gesetzes ist eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente, umweltverträgliche und treibhausgasneutrale leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität, Gas und Wasserstoff, die zunehmend auf erneuerbaren Energien beruht. Daraus ergibt sich, dass Erzeugung, Übertragung und Verteilung in verschiedenen Geschäftsbereichen ausgeführt werden müssen.

- Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG)

Für Vorhaben im Bereich der Hochspannungsnetze mit einer Nennspannung von 380 Kilovolt oder mehr, die der Anpassung, Entwicklung und dem Ausbau der Übertragungsnetze zur Einbindung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen, zur Interoperabilität der Elektrizitätsnetze innerhalb der Europäischen Union, zum Anschluss neuer Kraftwerke oder zur Vermeidung struktureller Engpässe im Übertragungsnetz dienen besteht ein vordringlicher Bedarf, der als Bedarfsplan in diesem Gesetz als Anlage beigefügt ist.

⁸ European Environment Agency – EEA.

⁹ Bundesnetzagentur Stand 2020.

- Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG)

Die Beschleunigung des Ausbaus der länderübergreifenden und grenzüberschreitenden Hochspannungsleitungen erfolgt nach Maßgabe dieses Gesetzes. Dieses Gesetz schafft die Grundlage für einen rechtssicheren, transparenten, effizienten und umweltverträglichen Ausbau des Übertragungsnetzes sowie dessen Ertüchtigung. Die Errichtung und der Betrieb sowie die Änderung von Stromleitungen, die in den Anwendungsbereich dieses Gesetzes fallen, einschließlich der für den Betrieb notwendigen Anlagen, liegen im überragenden öffentlichen Interesse und dienen der öffentlichen Sicherheit. Bis die Stromversorgung im Bundesgebiet nahezu treibhausgasneutral ist, soll der beschleunigte Ausbau dieser Stromleitungen und Anlagen als vorrangiger Belang in die jeweils durchzuführende Schutzgüterabwägung eingebracht werden.

- Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG)

Für die Vorhaben, die der Anpassung, Entwicklung und dem Ausbau der Übertragungsnetze zur Einbindung von Elektrizität aus erneuerbaren Energiequellen, zur Interoperabilität der Elektrizitätsnetze innerhalb der Europäischen Union, zum Anschluss neuer Kraftwerke oder zur Vermeidung struktureller Engpässe im Übertragungsnetz dienen, werden die energiewirtschaftliche Notwendigkeit und der vordringliche Bedarf zur Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Netzbetriebs festgestellt. Die Realisierung dieser Vorhaben ist aus Gründen eines überragenden öffentlichen Interesses und im Interesse der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit erforderlich. Zu den Vorhaben gehören auch die für den Betrieb von Energieleitungen notwendigen Anlagen einschließlich der notwendigen Änderungen an den Netzverknüpfungspunkten. Die Vorhaben beginnen und enden jeweils an den Netzverknüpfungspunkten.

4 Schlussfolgerungen

- Die elektrische Energieversorgung ist auf dem Weg, die Energiewende in ihrem Sektor zu schaffen.
- Erneuerbare Energieformen wie Windkraft und Photovoltaik erfordern eine hinreichende Speicherung, da volatile Erzeugung kompensiert werden muss.
- Wandlung der mit Windkraft und Photovoltaik erzeugten elektrischen Energie in andere Energieformen wie Wasserstoff, Wärme, Pumpspeicherkraftwerke.
- Große Investitionen in Netze und Informationstechnik sind erforderlich.
- Sinnvolle, technisch basierte, politische Entscheidungen sind notwendig.
- Ein Umdenken in der Gesellschaft bezüglich Energienutzung ist notwendig. 41 Mio. Haushalte benötigen bei 100 W pro Haushalt eine elektrische Leistung von ca. 4 GW, ein Rechenzentrum in Deutschland ca. 2 GW.

SOMMERFEST
der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft
am 30. Juni 2023

**Numerische Simulationen von Sedimenttransport in
Offenen Gewässern**

BERNHARD VOWINCKEL

Inhaber des Lehrstuhls für Transportprozesse in Hydrosystemen, Institut für
Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft, TU Dresden, 01062 Dresden
E-Mail: bernhard.vowinckel@tu-dresden.de

1 Einleitung

Sedimenttransport ist allgegenwärtig in der Umwelt und formt maßgeblich die Landschaften, in denen wir heute leben. Angesichts des globalen Klimawandels wird es immer wichtiger werden, das Prozessverständnis zu Ursachen und Wirkung des Sedimenttransports zu schärfen, um belastbare Aussagen über deren Intensität zu treffen. Das wird bereits dadurch deutlich, dass von den 17 globalen Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen 8 direkt oder indirekt mit Wasserqualität und Wasserverfügbarkeit als Ressource aber auch als Naturgefahr in Verbindung stehen. Bereits heute ist zu beobachten, dass die zunehmende Häufigkeit von extremen Wetterereignissen Dynamiken mit teils katastrophalen Konsequenzen verursachen können. Prominente Beispiele aus Deutschland sind die Überflutungen der Elbe und der Ahr aus den Jahren 2002 und 2021.

In diesem Beitrag wird deshalb eine Übersicht über den derzeitigen Wissenstand von Simulationstechniken präsentiert, um hochaufgelöste Daten des Sedimenttransports unter kontrollierten Randbedingungen zu gewinnen. Solche Untersuchungen sind notwendig, weil sich daraus wichtige Erkenntnisse ableiten lassen, anhand derer konstitutive Schließungsansätze von größerskaligen Sedimenttransportmodellen verbessert werden können, um Prozesse genauer abbilden zu können, die mit ingenieurstechnischen Mitteln nicht ohne weiteres zu erfassen sind (Vowinckel, 2021).

Dieser Artikel ist wie folgt aufgebaut. Zuerst werden grundlegende Prinzipien der partikel aufgelösten direkten numerischen Simulation (DNS) als Ausgangspunkt für die numerische Modellierung von Mehrphasenströmungen beschrieben. Danach werden drei typische Beispiele vorgestellt, durch die wertvolle Erkenntnisse über die grundlegenden physikalischen Mechanismen von Sedimenttransport in offenen Gewässern gewonnen werden können: (1) das Absetzverhalten von flokkulierendem, feinkörnigem Sediment, (2) das Fließverhalten von Schlammlawinen und (3) die Sohlformentwicklung in Flüssen bei schießendem Abfluss. Der Artikel schließt mit einem Fazit und einem kurzen Ausblick.

2 Partikel aufgelöste direkte numerische Simulation

Direkte Numerische Simulationen (DNS) haben den Anspruch, dass das numerische Gitter selbst die feinsten Wirbelfilamente einer turbulenten Strömung in Raum und Zeit auflöst. Solch hoch aufgelöste Simulationen integrieren deshalb die Navier-Stokes Gleichung (NSG)

$$\frac{\partial \mathbf{u}_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = \frac{1}{\rho_f} \nabla \tau_f + \mathbf{f}_{IBM} \quad (1)$$

und die Kontinuitätsgleichung

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0 \quad (2)$$

für inkompressible Fluide in Raum und Zeit. Hierbei ist \mathbf{u}_f der Vektor der Fluidgeschwindigkeit, ρ_f die Dichte des Fluids und τ_f der Spannungstensor, der sowohl Druckkräfte als auch viskose Spannungen beinhaltet. Der letzte Term auf der rechten Seite der NSG, \mathbf{f}_{IBM} , repräsentiert die Kopplung von Partikeln und Fluid über die *Immersed Boundary Methode* (IBM), die in dieser Form von Uhlmann (2005) vorgeschlagen wurde und in den hier vorgestellten Arbeiten über die Implementierung von Biegert et al. (2017) zum Einsatz gekommen ist. Dieser Kopplungsterm wird so in das Rechengitter eingebracht, dass eine Haftbedingung an der Partikeloberfläche aufgeprägt wird.

Aus der Kopplung durch die IBM lässt sich in einem nächsten Schritt die Partikelbewegung und -rotation über die Newton-Euler Gleichungen

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_{h,p} + \mathbf{F}_{g,p} + \mathbf{F}_{c,p} \quad (3)$$

und

$$I_p \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{T}_{h,p} + \mathbf{T}_{c,p} \quad (4)$$

berechnen. Hierbei ist der Geschwindigkeitsvektor des Partikels mit Index p , m_p ist die Masse dieses Partikels und $\mathbf{F}_{h,p}$, $\mathbf{F}_{g,p}$, $\mathbf{F}_{c,p}$ sind die jeweiligen auf das Partikel einwirkenden Kräfte aus der hydrodynamischen Interaktion, Gravitation und Kollision. Gleiches gilt für die Berechnung der Rotationsrate $\boldsymbol{\omega}_p$ mit dem Trägheitsmoment und die einwirkenden Drehmomente $\mathbf{T}_{h,p}$ und $\mathbf{T}_{c,p}$ aus hydromechanischem Widerstand und Kollision.

Da mit diesem Ansatz sowohl die Strömung als auch die Bewegung aller Sedimentkörner berechnet wird, die sich im Rechengebiet befinden, spricht man in diesem Zusammenhang auch von Euler-Lagrange Simulationen. Gleichungen 3 und 4 beinhalten als wichtige Vereinfachung, dass die Sedimentkörner als kugelförmig Partikel approximiert werden, was für viele Anwendungsfälle eine gute Näherung von natürlichem Granulat darstellt (Vowinckel, 2021; Vowinckel et al., 2023). Zur Analyse der Flokkulierung von feinkörnigem Material wurde eine wichtige Erweiterung von Vowinckel et al. (2019b) vorgeschlagen. In dieser Studie wurde die resultierende Kraft aus Kollision und Kontakt um die Komponente einer kohäsiven Kraft erweitert, die Partikel aneinanderbindet, sobald sie sich auf eine kritische Distanz hin genähert haben, die üblicherweise weniger als 5% des Partikeldurchmessers D_p beträgt.

3 Typische Beispiele für Sedimenttransport

3.1 Sedimentation von flokkulierendem, feinkörnigem Sediment

Um den Einfluss von Kohäsionskräften auf den Sedimentationsprozess zu untersuchen, simulierten Vowinckel et al. (2019a, 2019b) das Absetzen einer Suspension mit 15% Volumenkonzentration für die von te Slaa et al. (2015) berichteten experimentellen Bedingungen. Ein polydisperses Gemisch aus 1261 Partikeln unterschiedlicher Größe wurde in einen Tank mit ruhender Flüssigkeit gegeben.

Die Korngrößenverteilung wurde durch eine kumulative Lognormalverteilung mit einem maximalen Größenverhältnis von $\max\{D_p\}/\min\{D_p\} = 4$ vorgegeben. Das Berechnungsgebiet hat die Größe $L_x \times L_y \times L_z = 13.1D_{50} \times 40.0D_{50} \times 13.1D_{50}$. Hierbei sind L_x , L_y und L_z die Abmessungen in x , y und z -Richtung des quaderförmigen Rechengebiets und D_{50} ist der Mediandurchmesser der Partikelgrößenverteilung.

Das Rechengitter löst die Strömung um jedes Partikel voll auf, so dass ein einzelnes Partikel mit dem Durchmesser D_{50} mit 18,25 Gitterzellen diskretisiert ist. Die Schwerkraft zeigt in die negative y -Richtung. Wir nehmen periodische Randbedingungen in x - bzw. z -Richtung an, zusammen mit einer Haftbedingung an der unteren Wand und einer scherfreien Bedingung an der oberen Wand (Abbildung 1). Es wurden zwei Simulationen mit unterschiedlichen Eigenschaften durchgeführt: (i) kohäsionsloses Granulat und (ii) stark kohäsives Sediment. Bei beiden Simulationen werden die Partikel in einem ruhenden Fluid aus der Ruhelage initialisiert und setzen sich anschließend unter dem Einfluss der Schwerkraft ab.

Die Auswirkung von Kohäsionskräften auf das Absetzverhalten wird in Abbildung 1 dargestellt. In der Bilderfolge sind die Partikelkonfigurationen in der Anfangsphase bei beiden Simulationen sehr ähnlich. Im weiteren Verlauf der Simulationen zeigt sich jedoch, dass sich das kohäsive Sediment schneller absetzt als sein nicht-kohäsives Äquivalent. Diese qualitative Beobachtung wird durch die horizontal gemittelten Konzentrationsprofile bestätigt, die als Konturen in Abbildung 2 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt sind.

Die Volumenanteilkonturen für die beiden Simulationen sind anfangs nahezu identisch, da die kohäsiven Teilchen noch nicht genügend Zeit zum Flokkulieren hatten. Danach bilden sich für beide Simulationen zwei unterschiedliche Fronten heraus. Die obere Front (grau zu weiß) markiert den Übergang zwischen der klaren Flüssigkeit und dem suspendierten Sediment, während die zweite Front (grau zu schwarz) den Übergang zwischen dem suspendierten Sediment und dem Sedimentbett zeigt. Während des weiteren Verlaufs verschmelzen die beiden Fronten für die Simulationsdaten des kohäsiven Sediments zu einer einzigen. Dieser Zeitpunkt wird als Kontraktionspunkt bezeichnet und markiert den Übergang vom Absetzvorgang zur Konsolidierung des bereits abgelagerten Sediments, bei dem sich das Korngerüst durch Entwässerung des Porenraums über die Zeit verdichtet. Das kohäsionslose Sediment hingegen hat den Punkt der Kontraktion am Ende der Simulation noch nicht erreicht.

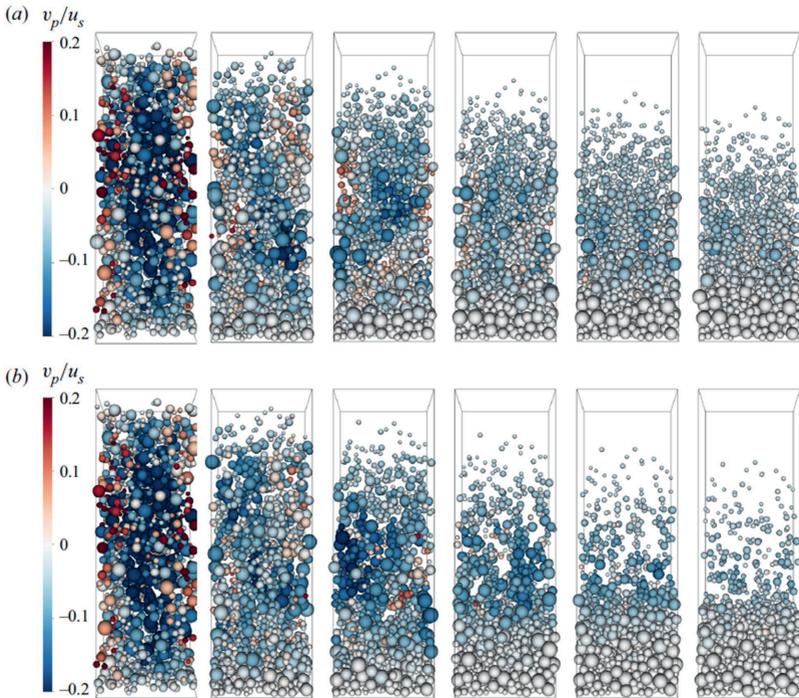


Abb. 1: Partikelkonfigurationen während des Absetzvorgangs für (a) kohäsionsloses und (b) kohäsives Sediment. Die Einföhrung der Partikel repräsentiert die Sedimentationsgeschwindigkeit. Das kohäsive Sediment setzt sich schneller ab als das kohäsionslose Granulat. (Bild entnommen aus Vowinckel et al., 2023).

Die Simulationskampagne von Vowinckel et al. (2019a, b) liefert deshalb wichtige Informationen über die effektive Absetzgeschwindigkeit von Partikeln in Suspensionen mit hoher Volumenbelastung. Als ein Beispiel für eine relevante Anwendung beeinflusst dieser Effekt die Auslaufstrecke von Trübungsströmen (sogenannte Unterwasserlawinen, Meiburg und Kneller, 2010) und ist daher ein wichtiger Eingangsparameter für großskalige Sedimenttransportmodelle. Die Absetzgeschwindigkeit hingegen verringert sich auf Grund drei wichtiger Effekte: (1) es erfolgt eine Änderung des relativen Partikelaufltriebs in der Suspension, (2) die sich absetzenden Körner erzeugen eine aufwärts gerichtete Gegenströmung und (3) durch die Partikel-Partikel-Wechselwirkungen entstehen Kollisionen und Kontakt wodurch Reibungsverluste entstehen, die die Zähigkeit der Suspension erhöhen. Diese Effekte können mit den vorliegenden Daten genau ausgewertet werden, um Rückschlüsse auf deren Wichtigkeit für verschiedene Fluid- und Partikeleigenschaften zu ziehen.

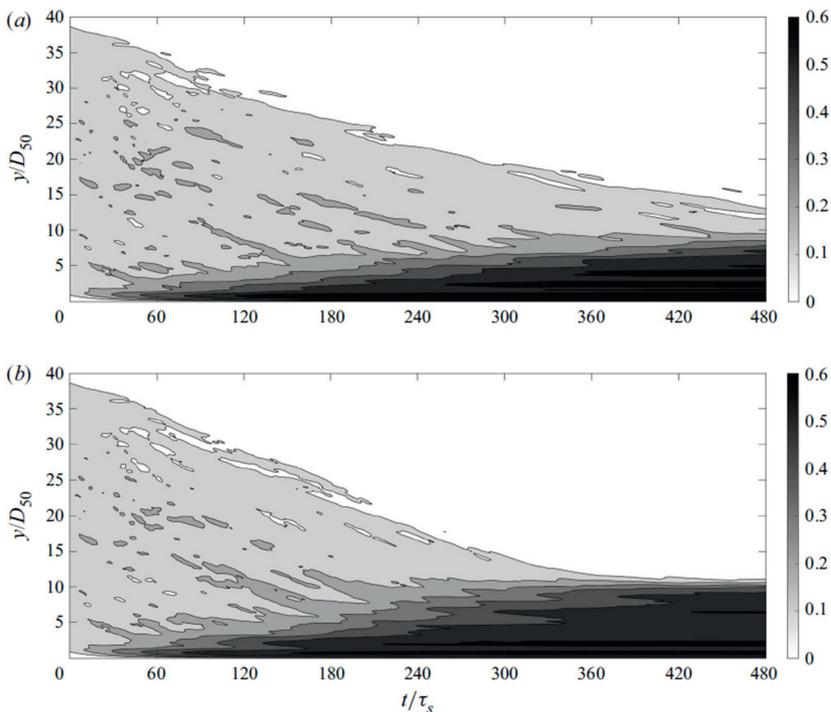


Abb. 2. Konturen des horizontal gemittelten Partikelvolumenanteils über die Zeit: (a) kohäsionsloses Sediment und (b) kohäsives Sediment (Bild entnommen aus Vowinckel et al., 2019a).

3.2 Fließverhalten von dichten Suspensionen

Um das Fließverhalten und damit die Rheologie dichter Suspensionen physikalisch fundiert vorherzusagen, erfordert es konstitutive Gleichungen für die Fluid-Partikel-Wechselwirkung, um die subskaligen Prozesse beschreiben zu können, in denen sich die korrekte Beschreibung der Eigenschaften des Fluids und der suspendierten Partikel widerspiegeln müssen (Vowinckel, 2021). Insbesondere benötigt es Strategien zur Beschreibung der effektiven Viskosität des Gemischs, des granularen Drucks und des granularen Scherspannungstensors, damit der Impulsaustausch zwischen der flüssigen und der partikulären Phase beschrieben werden kann. Für Suspensionen von Partikeln, die eine größere Dichte als Wasser besitzen, ist bekannt, dass die Zähigkeit der Suspensionen nicht mehr allein von den internen molekularen viskosen Spannungen bestimmt wird, sondern auch von den durch Kontakt und Reibung verursachten Kräften

zwischen den Partikeln. Daraus ergibt sich die Idee einer effektiven Viskosität, die größer ist als die Viskosität der klaren Flüssigkeit und eine Funktion des Feststoffanteils in der Suspension ist.

Ein Meilenstein in diesem Bereich wurde durch Boyer et al. (2011) erreicht, indem ein Konzept vorgeschlagen wurde, bei dem Überlegungen von trockenen granularen Strömungen auf Suspensionen in viskosen Flüssigkeiten übertragen wurden. Ein wichtiges Merkmal ist dabei, dass es dem Sediment erlaubt ist, seinen Porenraum unter Scherung auszudehnen, was als Dilatanz bezeichnet wird. Dadurch ist es möglich, das Fließverhalten der dichten Suspension über eine makroskopische Rauheit $\mu = \tau/P$ zu beschreiben, womit man die Anisotropie der auf die Suspension wirkenden Scherkräfte τ im Verhältnis zum aufliegenden granularen Druck P beschreibt. Diese makroskopische Rauheit ist in der Folge eine Funktion der dimensionslosen Scherrate $J = \eta\dot{\gamma}/P$, wobei die dynamische Viskosität des Fluids und die Scherrate darstellt. Boyer et al. (2011) haben mit ihren Experimenten gezeigt, dass die makroskopische Rauheit bei steigender Scherbeanspruchung zunimmt. Über den Effekt der Dilatanz lässt sich ebenso ein funktionaler Zusammenhang des Feststoffanteils ϕ zur dimensionslosen Scherrate zeigen, wobei der Porenraum auf Grund der zunehmenden Scherung aufgeweitet wird. Infolgedessen nimmt der Feststoffanteil bei steigender Scherbeanspruchung ab.

Ursprünglich wurden die Korrelationen für die effektive Viskosität und die makroskopische Rauheit aus dem gemittelten Fließverhalten einer dichten Suspension von auftriebsneutralen Partikeln in ringförmigen Versuchsrinnen ermittelt (z. B. durch Morris und Boulay, 1999; Boyer et al., 2011). In dieser Versuchsanordnung, die man auch als Rheometrie bezeichnet, wird die Strömung durch eine bewegte Wand angetrieben. Diese Art, die Strömung anzutreiben, erzeugt eine lineare Scherströmung, die auch als Couette-Strömung bekannt ist. Neuere experimentelle und numerische Studien haben allerdings den Beweis erbracht, dass diese Korrelationen $\mu(J)$ und $\phi(J)$ auch auf der lokalen Mikroskala in einem Sedimentbett gelten, die durch laminare viskose Strömungen gesichert werden (Houssais et al., 2016; Vowinckel et al., 2021; Rettinger et al., 2022). Im Vergleich zur Rheometrie ist dabei wichtig zu verstehen, dass der granulare Druck im Sedimentbett durch die Auflast des darüber befindlichen Granulats verursacht wird. Dies bedeutet, dass der granulare Druck mit der Tiefe im Sedimentbett zunimmt, während die Scherrate abnimmt, so dass sich mit einem einzigen Szenario das vollständige Fließverhalten über die oben beschriebenen Korrelationen ausdrücken lässt.

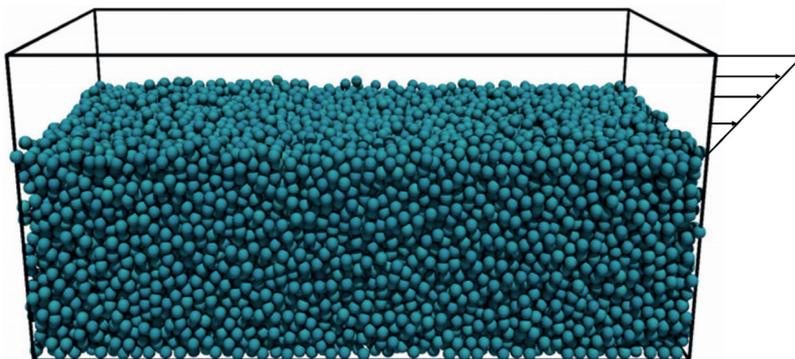


Abb. 3. Skizze des Simulationenaufbaus der Scherströmung, die durch eine bewegte Wand am oberen Rechengebietsrand angetrieben wird. Das Sedimentbett ist in seiner initialen Anordnung dargestellt (Darstellung entnommen aus Rettinger et al., 2022).

Um diese physikalischen Phänomene noch besser zu untersuchen, wurden von Rettinger et al. (2022) hochaufgelöste Simulationen eines mobilen Sedimentbetts durchgeführt, die durch eine Couette-Strömung gesichert wurden. Dadurch stellt sich eine konstante Scherspannung im gesamten Rechengebiet ein. Die Strömung wurde so kontrolliert, dass keine Turbulenzen entstehen. Zusätzlich wurde eine Haftbedingung an der bewegten Wand und dem Boden und an der Partikeloberfläche aufgeprägt. In Spannweiten- und Strömungsrichtung ist das Rechengebiet periodisch. Die Daten wurden mit vollständig gekoppelten, vollauflösenden direkten numerischen Simulationen unter Verwendung einer kombinierten Lattice-Boltzmann-Diskrete-Elemente-Methode erzeugt. Der Rechenansatz entspricht hierbei denselben Prinzipien, wie sie in Abschnitt 1 weiter oben beschrieben sind. Das Sedimentbett besteht aus insgesamt 26000 Partikeln, die mit 20 Gitterzellen pro Durchmesser diskretisiert wurden (Abbildung 3). Diese hochaufgelösten Daten liefern detaillierte tiefenaufgelöste Profile der relevanten physikalischen Größen, die die Rheologie bestimmen, d. h. die lokale Scherrate der Flüssigkeit, der Partikelvolumenanteil und der granulare Druck. Ein Vergleich mit experimentellen Daten von Houssais et al. (2016) und den empirischen Korrelationen von Boyer et al. (2011) zeigt eine exzellente Übereinstimmung der Ergebnisse (Abbildung 4).

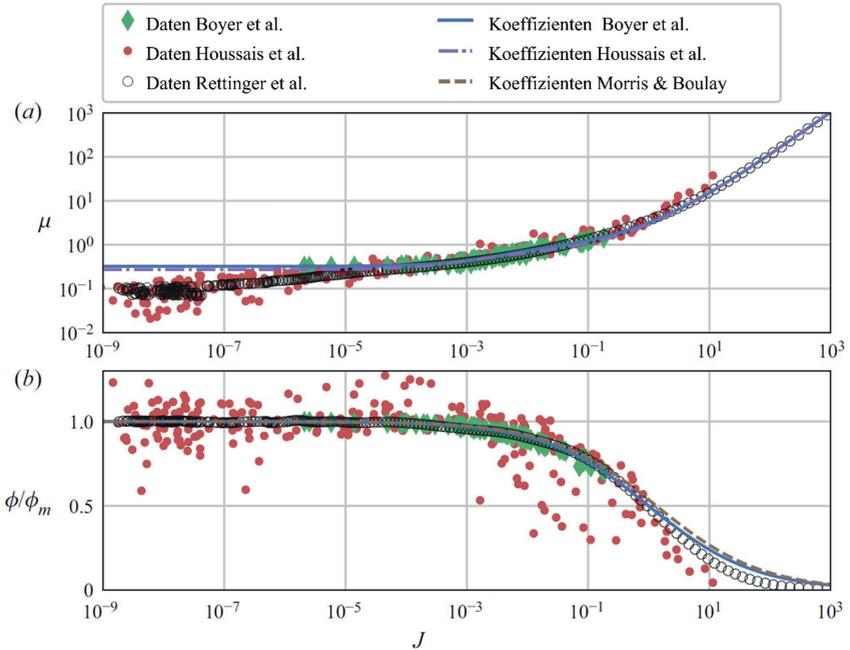


Abb. 4. Rheologische Größen (a), μ und (b), ϕ als Funktion der Viskositätszahl J für ein monodisperses Sedimentbett aus Simulationen von Rettinger et al. (2022) sowie experimentelle Daten von Boyer et al. (2011) und Houssais et al. (2016). Zusätzlich sind die empirischen Korrelationen von Boyer et al. (2011) gezeigt, die aus den experimentellen Daten von Boyer et al. (2011) Houssais et al. (2016) und Morris & Boulay (1999) abgeleitet wurden (Bild entnommen von Rettinger et al., 2022).

Als wichtige Beobachtung lässt sich an Hand dieses Vergleichs zeigen, dass die Daten für Sedimenttransport von Houssais et al. (2016) und Rettinger et al. (2022) von den empirischen Korrelationen von $\mu(J)$ für kleine Scherraten ($J < 10^{-5}$) zu kleineren Werten von μ abweichen (Abbildung 4a). Dies deutet auf eine erhöhte Fließfähigkeit des Sediments hin, die messtechnisch nur sehr aufwendig zu erfassen ist, sich aber in wichtigen Phänomenen, wie zum Beispiel dem Kriechverhalten von granularen Medien über sehr lange Zeitskalen widerspiegeln. Die Simulationsdaten zeigen, dass die Kriechbewegung immer dann entsteht, wenn die mittlere Scherrate so klein wird, dass der quadratische Mittelwert der Fluktuationen der Scherrate (engl. *Root-mean square* oder RMS) die maßgebende Größe für die Scherdeformation des Sedimentbetts wird.

Für die Korrelation $\phi(J)$ lässt sich eine solche Abweichung nicht feststellen (Abbildung 4b). Das ist insbesondere dann der Fall, wenn man die Daten mit dem maximal möglichen Volumenanteil der granularen Schüttung ϕ_m normiert. Ein höherer Wert ist selbst bei sehr kleinen Scherraten nicht möglich. Der maximale Volumenanteil stellt damit einen wichtigen Materialparameter dar, um die Rheologie des Sediments zu beschreiben. Tatsächlich konnten Rettinger et al. (2022) zeigen, dass sich durch die Kenntnis von ϕ_m die Rheologie von polydispersen Schüttungen mit einer Korngrößenverteilung, die mit einer Log-Normal-Verteilung beschrieben ist, rekonstruieren lässt.

3.3 Sohlformentwicklung in superkritischen Strömungen

Die Wechselwirkung von superkritischen turbulenten Strömungen mit granularen Sedimentbetten ist sowohl experimentell als auch numerisch schwierig zu untersuchen. In superkritischen oder auch schießenden Strömungen mit hohen Fließgeschwindigkeiten U und geringer Wassertiefe H entstehen Sohlformen, die sich von unterkritischen Strömungen unterscheiden. Die Strömungsverhältnisse werden dabei durch die Froudezahl $Fr = U/\sqrt{gH}$ beschrieben, wobei die Erdbeschleunigung darstellt. In unterkritischen Strömungen, d. h. $Fr < 1$, sind die dominanten Sohlformen Dünen und Rippel, die sich stromab fortbewegen. In superkritischen Strömungen ($Fr > 1$) kann sich dieser Mechanismus umkehren und es entstehen sogenannte Antidünen, die sich stromauf fortbewegen können. Ein weiteres wichtiges Merkmal von Antidünen in superkritischen Strömungen ist die Deformation der Wasseroberfläche, die sich in Phase mit den Sohlformen befindet. Aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeiten und geringen Wassertiefen ist es jedoch sehr schwer, nichtinvasive Messungen unter Laborbedingungen durchzuführen. Partikel aufgelöste DNS stellen deshalb eine vielversprechende Alternative dar, um die relevanten Prozesse einer solchen Sohlformentwicklung mit hoher Auflösung unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen.

Mit diesem Ansatz haben Schwarzmeier et al. (2023) partikel aufgelöste Simulationen in Verbindung mit einer verformbaren Flüssigkeitsoberfläche durchgeführt, um die Ausbildung und Ausbreitung von stromaufwärts migrierenden Antidünen (SMA) in überkritischen Strömungen zu reproduzieren. In dieser Studie war es möglich, eine experimentelle Kampagne numerisch nachzustellen, die kürzlich von Pascal et al. (2021) durchgeführt wurde. Pascal et al. (2021) gelang es, die Ausbreitung von SMAs mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung unter Laborbedingungen zu messen. Für ihre Simulationskampagne verwendeten Schwarzmeier et al. (2023) einen innovativen Ansatz, der die Cumulant-Lattice-Boltzmann-Methode für die Strömung, ein geeignetes Kollisionsmodell für die

Partikelinteraktion und die Volume-of-Fluid-Methode für die freie Wasseroberfläche kombiniert (Abbildung 5). Genauere Details zu diesem Rechenansatz können Schwarzmeier et al. (2023) entnommen werden.

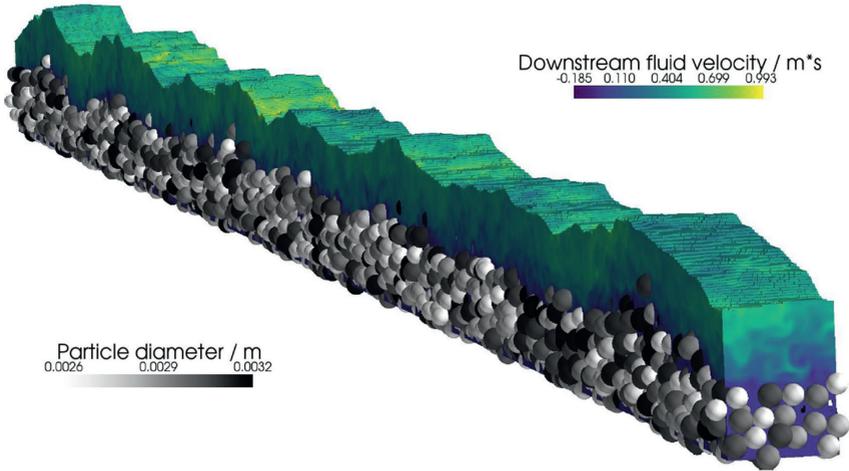


Abb. 5. Entwicklung von Antidünen in superkritischen turbulenten Strömungen mit freier Wasseroberfläche (Bild entnommen von Schwarzmeier et al., 2023).

Insgesamt wurden 6528 Partikel mit durchschnittlich 11,6 Gitterpunkten diskretisiert. Die für diesen Vergleich gewählten Strömungsparameter sind die Reynoldszahl, die Froude-Zahl und die Weber-Zahl um Effekte der Trägheit, Gravitation und Oberflächenspannung der Wasseroberfläche zu charakterisieren. Diese Parameter wurden in Übereinstimmung mit den Experimenten von Pascal et al. (2021) so gewählt, dass sich eine superkritische turbulente Strömung mit deformierter Wasseroberfläche einstellt. Als Anfangsbedingung wurde ein Sedimentbett ohne Sohlformen erstellt. Anschließend wurde die Strömung durch einen Druckgradient erzeugt, der ähnlich wie die Hangabtriebskraft als Volumenkraft auf das Fluid einwirkt. Die freie Wasseroberfläche ist dabei scherfrei und der Boden und die Partikel besitzen eine Haftbedingung. In Spannweiten- und Strömungsrichtung ist das Rechengbiet periodisch.

Durch die turbulente Strömung und die Scherung des Sediments entstanden SMA die in ihrer Erscheinungsform denen der Experimente von Pascal et al. (2021) sehr ähnlich waren. Tatsächlich zeigen die Simulationen eine bemerkenswerte Übereinstimmung zwischen Amplitude, Wellenlänge und Geschwindigkeit der Antidünen zu den experimentellen Messungen. Dies wird in Abbildung 6 anhand der in Spannweite gemittelten Sohlhöhe gezeigt, die über die Zeit abgetragen ist. Es ist eindeutig zu erkennen, dass sich der Scheitel der Antidünen mit der

Zeit nach stromauf verschiebt. Besonders hervorzuheben ist darüber hinaus die von Schwarzmeier et al. (2023) festgestellte sehr gute Übereinstimmung bei der Wandschubspannung, die ein Schlüsselfaktor für den Sedimenttransport ist. Ihre genaue Vorhersage ist für das Verständnis der Dynamik von Bettformen von wesentlicher Bedeutung. Die aus diesen Simulationen gewonnenen hochauflösenden Daten bieten eine Fülle von Informationen über die Flüssigkeits- und Partikelbewegung und stellen damit eine wichtige Ergänzung der experimentellen Messungen unter schwierigen superkritischen Strömungsbedingungen dar.

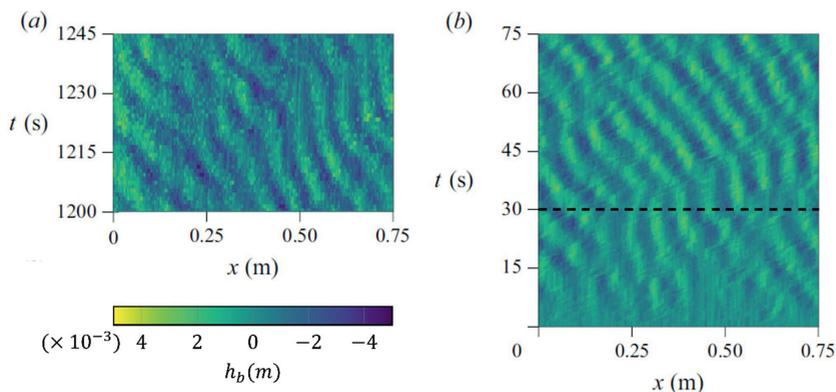


Abb. 6. Höhe des Sedimentbettes $h_b(x,t)$ für (a) die Experimente von Pascal et al. (2021) und (b) die Simulationen von Schwarzmeier et al. (2023). Für die Simulationen ist ebenfalls die Initialisierungsphase hin zu vollentwickelten Sohlformen gezeigt, was durch die gestrichelte schwarze Linie bei $t = 30$ s dargestellt ist (Bild entnommen von Schwarzmeier et al., 2023).

Die partikel aufgelösten Simulationen liefern deshalb wertvolle Einblicke in die Migrationsmechanismen von Antidünen und tragen zu einem besseren Verständnis der zugrunde liegenden Physik bei. Diese Arbeit bestätigt nicht nur die Genauigkeit des Simulationsansatzes, sondern ebnet auch den Weg für weitere umfangreiche Untersuchungen des Sedimenttransports bei superkritischen Strömungsbedingungen. Zukünftig sind deshalb weitere Simulationskampagnen erforderlich, um die physikalischen Prozesse der Entstehung und Migration von Antidünen und deren Morphodynamik zu untersuchen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Modellierung des Sedimenttransports wurden in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte erzielt. Die jüngsten Fortschritte in der numerischen Strömungsmechanik, gekoppelt mit geeigneten Methoden der partikel aufgelösten DNS, ermöglichen die Untersuchung einer Vielzahl von Sedimenttransportphänomenen auf verschiedenen Skalen. Diese Errungenschaften sind stark mit der Steigerung

der Rechenleistung von Supercomputern gekoppelt. Es ist nun möglich, partikel aufgelöste Simulationen von typischen Phänomenen wie dem Absetzverhalten von kohäsivem Sediment oder der Überströmung von Sedimentbetten in offenen Kanälen durchzuführen, die die Flüssigkeitsbewegung auf der Kornskala auflösen. Dadurch können Bettformentwicklungen wie Rippel und Dünen mit hoher Genauigkeit nachgebildet werden. Diese hochaufgelösten Simulationen können gut genutzt werden, um die Prozesse der Entwicklung von Bettformen zu verstehen. Dennoch wird es wichtig sein, die Techniken der partikel aufgelösten DNS weiter zu entwickeln, um eine bessere Darstellung natürlicher Prozesse zu erreichen. Naheliegender Entwicklungsbedarf ist z. B. die Behandlung von Partikeln, die eine realistischere und damit komplexere Geometrie haben.

Ebenso wichtig ist es jedoch, diese Prozesse in konstitutive Gleichungen zu überführen, die in größeren und recheneffizienteren Modellen als Schließungsansätze verwendet werden können, um subskalige Prozesse abbilden zu können. Wann immer es möglich ist, ist es wünschenswert, diese konstitutiven Gleichungen mit Hilfe von physikalisch basierten Skalierungsgesetzen abzuleiten. Ein gutes Beispiel dafür ist das rheologische Verhalten von dichten Partikelsystemen, die durch viskose Strömungen gesichert werden. Vielversprechende rheologische Skalierungsgesetze wurden bereits vorgeschlagen und erfolgreich in Sedimenttransportmodellen implementiert. Bislang gibt es verschiedene Ansätze für die Rheologie von Sedimentbetten, die entweder für dichtere oder eher verdünnte Partikelsysteme angewendet werden, aber in Bezug auf bestimmte extreme Strömungsregime Einschränkungen aufweisen. Daher sind weitere Arbeiten erforderlich, um zu einem konsistenten Satz von Werkzeugen zu erlangen, um die Vorhersagekapazität von Sedimenttransportmodellen zu erhöhen.

5 Literaturverzeichnis

- Biegert, E., Vowinckel, B., & Meiburg, E. (2017). A collision model for grain-resolving simulations of flows over dense, mobile, polydisperse granular sediment beds. *Journal of Computational Physics*, *340*, 105–127.
- Boyer, F., Guazzelli, É., & Pouliquen, O. (2011). Unifying suspension and granular rheology. *Physical Review Letters*, *107*(18), 188301.
- Houssais, M., Ortiz, C. P., Durian, D. J., & Jerolmack, D. J. (2016). Rheology of sediment transported by a laminar flow. *Physical Review E*, *94*(6), 062609.
- Meiburg, E., & Kneller, B. (2010). Turbidity currents and their deposits. *Annual Review of Fluid Mechanics*, *42*, 135–156.
- Morris, J. F., & Boulay, F. (1999). Curvilinear flows of noncolloidal suspensions: The role of normal stresses. *Journal of Rheology*, *43*(5), 1213–1237.
- Pascal, I., Ancey, C., & Bohorquez, P. (2021). The variability of antidune morphodynamics on steep slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, *46*(9), 1750–1765.

- Rettinger, C., Eibl, S., Rúde, U., & Vowinckel, B. (2022). Rheology of mobile sediment beds in laminar shear flow: effects of creep and polydispersity. *Journal of Fluid Mechanics*, 932, A1.
- Schwarzmeier, C., Rettinger, C., Kemmler, S., Plewinski, J., Núñez-González, F., Köstler, H., Rúde, U. & Vowinckel, B. (2023). Particle-resolved simulation of antidunes in free-surface flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 961, R1.
- Te Slaa, S., Van Maren, D. S., He, Q., & Winterwerp, J. C. (2015). Hindered settling of silt. *Journal of Hydraulic Engineering*, 141(9), 04015020.
- Uhlmann, M. (2005). An immersed boundary method with direct forcing for the simulation of particulate flows. *Journal of Computational Physics*, 209(2), 448–476.
- Vowinckel, B. (2021). Incorporating grain-scale processes in macroscopic sediment transport models: a review and perspectives for environmental and geophysical applications. *Acta Mechanica*, 232(6), 2023–2050.
- Vowinckel, B., Biegert, E., Luzzatto-Fegiz, P., & Meiburg, E. (2019). Consolidation of freshly deposited cohesive and noncohesive sediment: particle-resolved simulations. *Physical Review Fluids*, 4(7), 074305.
- Vowinckel, B., Withers, J., Luzzatto-Fegiz, P., & Meiburg, E. (2019b). Settling of cohesive sediment: particle-resolved simulations. *Journal of Fluid Mechanics*, 858, 5–44.
- Vowinckel, B., Biegert, E., Meiburg, E., Aussillous, P., & Guazzelli, É. (2021). Rheology of mobile sediment beds sheared by viscous, pressure-driven flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 921, A20.
- Vowinckel, B., Zhao, K., Zhu, R., & Meiburg, E. (2023). Investigating cohesive sediment dynamics in open waters via grain-resolved simulations. *Flow*, 3, E24.

PREISVERLEIHUNGEN

Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis für herausragende studentische Leistungen Leistungsstärke gepaart mit sozialem Engagement

Veranstaltungstag: 6. Dezember 2023

Veranstalter: Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis für herausragende
studentische Leistungen
Braunschweigesches Landesmuseum
Technische Universität Braunschweig
Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft

Veranstaltungsort: Zentrum für Pharmaverfahrenstechnik der Technischen
Universität Braunschweig, Franz-Liszt-Straße 35a,
38106 Braunschweig

Zum 28. Mal erhalten in diesem Jahr sieben Studierende der Technischen Universität Braunschweig für ihre herausragenden Studienleistungen und ihr besonderes Engagement den „Braunschweiger Bürgerpreis“. Die sieben Auszeichnungen, die mit je 1.500 Euro dotiert sind, werden zu einem großen Teil aus den Erlösen der „Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis für herausragende studentische Leistungen“ finanziert. Diese wurde 1996 von der engagierten Braunschweigerin Lieselotte Alter gegründet, die 2011 92-jährig verstorben ist. Jeweils ein Bürgerpreis mit je 1.500 Euro stellen der Soroptimist-Club Braunschweig und Carl Peter Langerfeldt für die Preisträgerinnen und Preisträger zur Verfügung. Außerdem werden aus Stiftungsmitteln drei bedürftige Studierende der TU Braunschweig mit insgesamt 4.000 Euro unterstützt.

Programm:**Begrüßung**

Vorstand PVZ

Grußwort

Prof. Dr. Angela Ittel, Präsidentin der TU Braunschweig

Grußwort

Brigitte Blum,

Vorstandsvorsitzende der Stiftung Braunschweiger Bürgerpreis

Preisverleihung und Vorstellung der Preisträger**Gratulation**

Prof. Dr. Reinhold Haux,

Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

MITTEILUNGEN

VERÖFFENTLICHUNGEN

Im Berichtsjahr wurde veröffentlicht:

Jahrbuch 2022 der BWG mit 256 Seiten

Geschäftliche Mitteilungen:

Am 31.12.2023 gehörten der BWG 150 ordentliche Mitglieder an, davon 68 unter 70 Jahren, sowie 58 korrespondierende Mitglieder. Die Zahl der Mitglieder unter 70 Jahren betrug in der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften 21, in der Klasse für Ingenieurwissenschaften 32 und in der Klasse für Geisteswissenschaften 16. Von den ordentlichen Mitgliedern zählten zum Bereich Braunschweig 79, zum Bereich Clausthal 17, zum Bereich Göttingen 8, zum Bereich Hannover 42, zum Bereich Osnabrück 3 und zum Bereich Brandenburg 1.

Das Plenum trat am 8.12.2023 zu seiner jährlichen Hauptsitzung zusammen, nahm den Jahresbericht des Präsidenten entgegen und beschloss den Haushalt 2024. In den Wahlsitzungen am 28.04.2023 und 8.12.2023 wurden die auf der Seite 340 vorgestellten Mitglieder zugewählt.

Die am 8. Dezember 2023 tagende Plenarversammlung stimmte dem Vorschlag der Klasse für Geisteswissenschaften für den Gauß-Preisträger 2024 zu und legte die Feierliche Jahresversammlung auf den 14.06.2024 fest.

PERSONALIA

Todesfälle

- 13.01.2023 Behrens, Peter, Prof. Dr., Professor am Institut für Anorganische Chemie an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 2003
- 08.02.2023 Görlitzer, Klaus, Prof. Dr.rer.nat., C4-Professor am Institut für Pharmazeutische Chemie der TU Braunschweig, dem jetzigen Institut für Medizinische und Pharmazeutische Chemie, Ordentliches Mitglied der Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften seit 1995, Korrespondierendes Mitglied seit 2005
- 10.05.2023 Stracke, Ferdinand, Prof. Dipl.-Ing., Professor am Lehrstuhl für Städtebau und Regionalplanung an der TU München verbunden mit der Leitung des Instituts für Städtebau und Raumplanung, Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 1985, Korrespondierendes Mitglied seit 1989
- 29.09.2023 Gahl, Klaus, Prof. Dr. med., Chefarzt der Medizinischen Klinik II am Städtischen Klinikum Braunschweig, Ordentliches Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1997
- 18.10.2023 Szlezák, Thomas Alexander, Prof. Dr., Ordinarius für Griechische Philologie an der Universität Tübingen, Korrespondierendes Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften seit 1994
- 05.11.2023 Merker, Günter Peter, Prof. Dr.-Ing.habil., Professor für Technische Verbrennung an der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften seit 2001

Corrigendum (Nachruf Rieger, Jahrbuch 2021)

Die Habilitation von Georg Johann Rieger an der Universität Gießen erfolgte 1956, und nicht wie irrtümlich angegeben 1963.

NACHRUFE

JOACHIM HENTZE

*23.06.1940 † 04.06.2022

„Das Führungsphänomen kann als zeitlich übergreifendes, in allen Kulturen existierendes und interdisziplinäres Faktum aufgefasst werden. Befassen sich mehr als eine Person arbeitsteilig mit einer Problemlösung, so entsteht ein Koordinationsbedarf. Führen, geführt werden, sich führen lassen und sich selbst führen, lässt sich als Produkt der Arbeitsteilung und Rollendifferenzierung beschreiben.“ Die zitierte Eingangspassage aus der 3. Auflage der „Personalführungslehre“ von Hentze/Kammel/Lindert aus dem Jahre 1997 beschreibt das zentrale Arbeitsgebiet von Joachim Hentze, von 1974–2006 Professor für Unternehmensführung am Institut für Wirtschaftswissenschaften der TU Braunschweig und von 2001–2022 Mitglied der Geisteswissenschaftlichen Klasse der BWG.

Hentze wurde 1940 als Sohn eines Ingenieurs im Mecklenburgischen Rechlin geboren. Nach dem Abitur absolvierte er ein mehrmonatiges Praktikum bei der Preussag, bevor er 1961 sein Studium der Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftspädagogik an der damals noch TH Hannover aufnahm, das er an der Universität Innsbruck und der Georg-August-Universität Göttingen fortsetzte. Nach dem Abschluss als Diplom-Handelslehrer 1966 wurde er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Seminar für Betriebswirtschaftslehre der TH Hannover und dort 1969 von seinem akademischen Lehrer Hans Böhrs an der Geistes- und Staatswissenschaftlichen Fakultät zum Dr. rer. pol. (Staatswissenschaften) promoviert mit einer Arbeit über „Quantitative und qualitative Analyse der Struktur der betrieblichen Tätigkeiten im Hinblick auf die Planung des Bedarfs, der Bedarfsdeckung und des Einsatzes von Personal“. Damit war die Richtung seiner künftigen akademischen Tätigkeit in Forschung und Lehre vorgegeben. Nach einem Interim von 1970–1973 als Rektorats- und Dekanatsassistent wurde Hentze 1974 zum Professor für Unternehmensführung am Institut für Wirtschaftswissenschaften der TU Braunschweig berufen. Kurioserweise habilitierte er sich erst 1985 an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg zum Thema „Strategischer Wandel und Management Development“. Hentze gehörte in den 1980er-/90er-Jahren zur Gründergeneration der wirtschaftswissenschaftlichen Professoren, die sich um den Aufbau der ersten Kombinationsstudiengänge des Wirtschaftsingenieurwesens mit drei Fachrichtungen und der Wirtschaftsinformatik an der TU Braunschweig in der Ära Rebe verdient gemacht haben. Dem Fachbereich für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften hat er als Dekan gedient. Rufen an die Universitäten Essen, Dresden und Leipzig ist er nicht gefolgt.

Seine durch zahlreiche Schriften und Lehrbücher belegten Lehr- und Forschungsgebiete innerhalb der BWL waren die Unternehmensführung und das Personalmanagement. Darunter ragen neben der zitierten „Personalführungslehre“ mit drei Auflagen das Standardwerk „Personalwirtschaftslehre 1 und 2“ mit jeweils sechs Auflagen und das „Personalcontrolling“ hervor. Bereits die Titel belegen das während des Studiums erkennbare Interesse, die BWL durch die Wirtschaftspädagogik zu ergänzen und damit den Vermittlungsgedanken zu verfolgen. Weitere Schwerpunkte waren Buchführung und Controlling in Krankenhäusern sowie Unternehmensethik und Nachhaltigkeitsmanagement. Der Katalog der Deutschen Nationalbibliothek verzeichnet 73 Treffer unter dem Stichwort „Joachim Hentze“.

Dietrich v. d. Oelsnitz und Andreas Kammel haben ihm im Jahre 2000 unter dem Titel „Kompetenzen moderner Unternehmensführung“ eine Festschrift zum 60. Geburtstag gewidmet. Weitere Ehrungen erhielt er als Ehrendoktor der TU Sofia und der Wirtschaftsuniversität Chisinau.

Letztere verweisen auf sein internationales hochschulpolitisches Engagement, das sich u. a. zusammen mit dem Soziologen Ulrich Heyder vom Institut für Sozialwissenschaften seit 1983 im Auftrag des Deutschen Akademischen Austauschdienstes in der Gründung und dem Betrieb eines Wirtschaftswissenschaftlichen Aufbaustudiengangs an der Deutschsprachigen Fakultät der TU Sofia äußerte. Gastprofessuren bekleidete er an den Universitäten von Omaha, Peking und Sofia.

Hentze ist am 4. Juni 2022 im Alter von fast 82 Jahren in Isernhagen bei Hannover gestorben.

Ulrich Menzel

PETER BEHRENS
*29.06.1957 †13.01.2023

35 Jahre Materialchemie

Peter Behrens, international renommierter Materialchemiker und langjähriges Mitglied unserer wissenschaftlichen Gesellschaft ist am 13. Januar 2023 in seinem Haus in der Wedemark verstorben. Er war ein hoch anerkannter und geschätzter Wissenschaftler, eine herausragende Persönlichkeit und ein hervorragender Hochschullehrer. Er ist vor allem durch seine Forschungsarbeiten zur Material- und Festkörperchemie über das eigene Fachgebiet hinaus bekannt geworden. Dem weiten Feld der mikro- und mesoporösen anorganischen Materialien setzte er einen ganz eigenen wissenschaftlichen Stempel auf, indem er vor allem die Türen in Richtung biomedizinische Anwendungen öffnete. Dabei dienten poröse Materialien, biomimetische Materialien und die Funktionalisierung fester Oberflächen unter anderem für Anwendungen in der Implantatforschung, der gezielten Wirkstofffreisetzung und der regenerativen Medizin. Während seiner wissenschaftlichen Laufbahn veröffentlichte Peter Behrens mehr als 300 Forschungsartikel in international renommierten Journalen.

Peter Behrens wurde am 29. Juni 1957 in Hamburg geboren. Er studierte Chemie an der Universität Hamburg, wo er im Jahre 1985 diplomierte und drei Jahre später, gefördert durch die Studienstiftung des Deutschen Volkes, zum Dr. rer. nat. auf dem Gebiet der Graphit-Intercalationsverbindungen promovierte. Er wechselte 1988 an die Universität Konstanz und beendete die erste Phase wissenschaftlicher Selbstständigkeit mit der Habilitation im November 1994. In jenes Jahr fiel auch ein 4-monatiger Postdoc-Aufenthalt an der University of California, Santa Barbara. Noch 1994 nahm Peter Behrens einen Ruf auf eine C3-Professur an der Ludwig-Maximilians-Universität München an. In dieser Zeit wurden viele Grundlagen für die folgenden Forschungsarbeiten gelegt. 1998 wechselte er auf eine C4-Professur nach Hannover, wo er schnell das Institut für Anorganische Chemie prägte. Ihm gelang frühzeitig eine Fokussierung auf die Materialchemie – eine Entscheidung, die retrospektiv als überaus erfolgreich bewertet werden muss.

In den 35 Jahren seiner akademischen Laufbahn betreute Peter Behrens insgesamt fast 100 Doktorandinnen und Doktoranden. Es war die interdisziplinäre Kombination der in seinem Labor verwendeten Techniken mit breitgefächerten Kooperationen hinein in die Medizin, Physik und zu den Ingenieurwissenschaften, die seine Arbeitsgruppe für so viele Studierende so attraktiv machte. Es steht außer Frage, dass seine freundliche, empathische, positive und integrierende Ausstrahlung verbunden mit seinem scharfen analytischen Verstand bedeutsam für die Etablierung diverser Kooperationen am Standort waren und sind. Speziell für die Leibniz Universität ist sein Name verknüpft mit der Gründung des Leibniz In-

stitut für Nano- und Quantenengineering (LNQE), dem ehemaligen Zentrum für Festkörperchemie und Neue Materialien (ZFM), den Exzellenz-Clustern HEARING4ALL und PhoenixD und der Konzeptionierung des Systemwechsels für die chemische Fortgeschrittenenausbildung aus dem Diplomzeitalter in die Master-Ära.

Wir verlieren mit Peter Behrens einen Kollegen, der die Lehr- und Forschungsinhalte an der Leibniz Universität Hannover maßgeblich über die letzten Jahrzehnte gestaltet hat und den wissenschaftlichen Diskurs in der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft aktiv gestaltete.

Es ist ein großer menschlicher Verlust und unser Mitgefühl gilt seinen Angehörigen.

Andreas Kirschning

KLAUS GÖRLITZER
* 27.09.1940 † 08.02.2023

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft trauert um ihr ehemaliges Mitglied Professor Dr. Klaus Görlitzer, der am 8. Februar im Alter von 82 Jahren verstorben ist.

Klaus Görlitzer wurde am 29.07.1940 in Guben in Brandenburg geboren und legte im Jahr 1959 in Berlin erfolgreich die Abiturprüfung ab. Zu dieser Zeit unterschied sich das Studium der Pharmazie vom Heutigen. Bevor das Studium an der Universität aufgenommen werden konnte, mussten ein zweijähriges Praktikum in Apotheken und eine Pharmazeutische Vorprüfung abgelegt werden. Letztere legte Prof. Görlitzer im Jahr 1961 ab und begann danach an der Freien Universität Berlin Pharmazie zu studieren, wo er im Jahr 1964 die Pharmazeutische Prüfung ablegte. Nach dem Studium musste ein weiteres Jahr Praktikum, die sogenannte Kandidatenzeit, absolviert werden, währenddessen Prof. Görlitzer bereits ein halbes Jahr am Pharmazeutischen Institut der FU Berlin arbeitete und Kontakte für die spätere Promotion knüpfte. Nach erfolgter Approbation als Apotheker im Jahr 1965 setzte er seine wissenschaftlichen Arbeiten am Pharmazeutischen Institut fort und wurde im Jahr 1968 mit der Dissertation „Darstellung und systematische Charakterisierung von Polyhydroxyauronen“, die er unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. G. Schenck anfertigte, promoviert. Prof. Görlitzer entschied sich, an der Freien Universität zu bleiben und eine Habilitation anzustreben. Während dieser Zeit war er als Assistenzprofessor tätig. Die Habilitation für das Fach Pharmazeutische Chemie erfolgte im Jahr 1976 mit der Arbeit „Untersuchungen an 1,3-Dicarbonylverbindungen: (2-Acyl-3-hydroxy)-indole, -benzo[b]furane, -benzo[b]-thiophene und 2-Acyl-1-indanone“. Kurz nach der Ernennung zum Privatdozenten erfolgte bereits der Ruf auf eine AH4-Professur (später C2-Professur) am Institut für Pharmazie der Freien Universität Berlin, die er von 1977 bis 1985 bekleidete. Im Jahr 1984 erhielt Prof. Görlitzer zwei Rufe: einen auf eine C3-Professur für Pharmazeutische Chemie an die Universität Marburg und einen auf die C4-Professur für Pharmazeutische Chemie der TU Braunschweig. Den Ruf nach Braunschweig nahm Prof. Görlitzer an und prägte das Institut für Pharmazeutische Chemie der TU Braunschweig, bis er im Jahr 2005 in den Ruhestand versetzt wurde. Im Jahr 1995 wurde er als Ordentliches Mitglied in die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft aufgenommen, wo er sich mit Übersichtsarbeiten und Klassenvorträgen aktiv engagierte.

Prof. Görlitzer hat im Bereich der Pharmazeutischen Chemie ein umfangreiches wissenschaftliches Werk geschaffen. In 170 Publikationen befasst er sich insbesondere mit der Chemie von Heterozyklen, die ein wichtiger Baustein von vielen Arzneistoffen sind und mit pharmazeutisch-analytischen Fragestellungen, die bedeutsam für die Qualitätskontrolle von Arzneistoffen sind. Im Bereich der Heterozyklenchemie hat er eine beeindruckende Vielzahl neuer chemischer Strukturen und interessanter Reaktionen erschlossen und dabei Wirkstoffe aus vielen verschiedenen Stoffklassen bearbeitet, wie z. B. Diuretika, Calciumkanalblocker, Gyrasehemmer, Malariamittel, starke Analgetika, Steroide und β -Rezeptorenblocker. Eine Übersichtsarbeit zu Chindolinen ist in den Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in Band 48 (1997) erschienen.

Als pharmazeutisch-analytische Themen standen insbesondere Arbeiten zu Farbreaktionen im Fokus von Prof. Görlitzer, die zur damaligen Zeit als Identitätsnachweis von Arzneistoffen unter apothekengerechten Bedingungen eingesetzt wurden. Er hinterfragte dabei auch das Offensichtliche mit überraschenden Ergebnissen. Zum Nachweis von Morphin und seinen Abkömmlingen wird die sogenannte Marquis-Reaktion eingesetzt. Generationen von Pharmaziestudierenden kennen den Reaktionsmechanismus hin zum farbigen Endprodukt. Allerdings konnte dieses von Prof. Görlitzer und seinen Mitarbeitenden nicht isoliert werden, sodass der entstehende Farbstoff im Lichte dieser Arbeiten als unbekannt gelten muss. Diese Ergebnisse sind ebenfalls in einer Übersicht zur Chemie und Analytik von Morphin in den Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in Band 51 (2001) beschrieben.

Auch mit der quantitativen Bestimmung von Arzneistoffen beschäftigte sich Prof. Görlitzer intensiv und hier insbesondere mit der bromometrischen Bestimmung von Wirkstoffen. Aufgrund seines analytischen Wissensschatzes fungierte er als Experte für Pharmazeutische Analytik. So war Prof. Görlitzer im Auftrag des Bundesgesundheitsamtes von 1980 bis 1985 an der Erstellung von Arzneistoff-Monographien für das Deutsche Arzneibuch beteiligt. Diese Monographien bilden die gesetzliche Grundlage für die Qualitätskontrolle der dort beschriebenen Arzneistoffe. Darüber hinaus war er als Sachverständiger für das Institut für Medizinische und Pharmazeutische Prüfungsfragen in Mainz tätig. Dort werden die Prüfungsfragen für das bundesweit einheitliche 1. Staatsexamen erarbeitet.

Nicht nur in Forschung und Lehre, sondern auch in der akademischen Selbstverwaltung hat sich Prof. Görlitzer engagiert. Bereits kurz nach seiner Berufung an die Technische Universität Braunschweig übernahm er für jeweils 2 Jahre das

Amt des Dekans und des Prodekanes im Fachbereich Chemie, Pharmazie und Biowissenschaften. Seit 1991 lenkte er als Geschäftsführender Leiter kollegial und in ruhiger Art das Institut für Pharmazeutische Chemie. Besonders in dieser Funktion haben Kollegen, Mitarbeitende und Studierende ihn kennen und schätzen gelernt. Er zeichnete sich durch große Offenheit gegenüber neuen Ideen, stete Gesprächsbereitschaft und Bescheidenheit aus. Sein weitgefächertes Interesse an den Naturwissenschaften und an fernen Ländern machten Prof. Görlitzer zu einem jederzeit sehr interessanten Gesprächspartner. Er reflektierte zusammen mit seinen Mitarbeitenden die Arbeit, die Wissenschaft und das Zeitgeschehen. Prof. Görlitzer war ein besonders warmherziges Beispiel für preußisches Pflichtbewusstsein und ein „Doktorvater“ alter Schule. Dabei lag es ihm besonders am Herzen, andere aus seinem Umfeld zu unterstützen und zu fördern. Wir werden ihn in dankbarer Erinnerung behalten.

Knut Baumann

FERDINAND STRACKE
* 27.05.1935 † 10.05.2023

Ferdinand Stracke, ehemaliger Ordinarius an der Architekturfakultät der TUM, ist am 10. Mai 2023 kurz vor seinem 88. Geburtstag verstorben. In Trauer gedenken seiner die Kolleg:innen des Departments of Architecture, TUM School of Engineering and Design.

Ferdinand Stracke wurde auf der Plenarversammlung am 15. März 1985 als ordentliches Mitglied der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft in die Klasse für Bauwissenschaften berufen. Nach dem Ruf an die Technische Universität München und die Übernahme der Leitung des Lehrstuhls für Städtebau und Regionalplanung wurde die Mitgliedschaft am 16. Januar 1989 in eine korrespondierende umgewandelt. Ferdinand Stracke wurde 1935 in Eslohe/Sauerland geboren. Er studierte ab 1958 Architektur an der TH Darmstadt und der TU Berlin und schloss 1963 mit dem Diplom in Darmstadt ab. Der früheste Entwurf, den wir von ihm kennen, sind Zeichnungen zum *Jugendheim Elspe* von 1958, professionelle Zeichnungen im 1. Semester eines Studiums nach einer Maurerlehre. Von 1963–1966 war Ferdinand Stracke wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Städtebau und Wohnungswesen an der TH Darmstadt bei Prof. Max Guthert. Gleichzeitig begann er seine freiberufliche Tätigkeit als Architekt und Stadtplaner, ebenfalls mit Max Guthert als Büro „Guthert und Stracke“, das er ab 1973 als „Stadtbauplan GmbH“ in Darmstadt/Bonn/München fortführte. Für seine erfolgreiche Praxis in den 60er und 70ern stehen Wettbewerbserfolge, Planungen und Realisierungen von Großwohnanlagen, u. a. Bonn-Tannenbusch, Leverkusen-Steinbüchl, Bonn-Beuel, Braunschweig-Kanzlerfeld und auch der Wettbewerbserfolg des dritten Bauabschnitts von Neuperlach Süd in München 1972 mit Max Guthert und Thomas Sieverts. Nach all diesen Neuplanungen folgten wenig später die ersten Konversionsprojekte wie z. B. in Delmenhorst. 1975 wurde das Planungsbüro „Stracke und Partner“ Bonn/Braunschweig gegründet.

Die städtebaulichen Typologien dieser Fülle an Entwürfen und Projekten waren deutlicher Ausdruck ihrer jeweiligen Epoche. Vor allem waren sie immer eng gekoppelt an die aktuelle Entwicklung neuer Wohnungstypologien. Ferdinand Stracke verstand Städtebau als soziale Aufgabe, den Wohnungsbau als einen ihrer Kerne. Parallel widmete er sich aber auch größeren Maßstäben, wie z. B. Stadtentwicklungsplanungen für Bonn, Salzburg, Schweinfurt, Gladbeck, Wilhelmshafen, Gießen, Seligenstadt oder später in den 1980er-Jahren der Studie zu Weimar/Erfurt. Hier untersuchte er die Entwicklungsmöglichkeiten einer ganzen Region auf strategisch-struktureller Ebene. Seine rege Entwurfs- und Planungstätigkeit führte schließlich in die akademische Karriere.

1975 wurde Ferdinand Stracke als ordentlicher Professor auf den Lehrstuhl für Städtebau, Wohnungswesen und Landesplanung an der TU Braunschweig berufen und Direktor des gleichnamigen Instituts. 1980–1983 war er Dekan des Fachbereichs Architektur an der TU Braunschweig und 1985–1987 Vizepräsident der TU Braunschweig.

1988 erfolgte dann die Berufung als ordentlicher Professor auf den Lehrstuhl für Städtebau und Regionalplanung an der TU München, verbunden mit der Leitung des Instituts für Städtebau und Raumplanung. 1994–1996 war er Dekan der Fakultät für Architektur der TU München. Den Lehrstuhl führte er als Ordinarius bis zu seiner Emeritierung 2003. In allen Maßstabsebenen des Städtebaus tätig, stellte er stets die Frage nach dem sozialen Bedarf als Ausgangspunkt des städtebaulichen Entwerfens und Planens. In seiner Zeit an der TUM widmete er sich intensiv der Lehre und förderte seine Assistenten auf ihrem persönlichen Weg in jeder Weise. Viele heute tätige Architekten in München wurden durch den begeisternden und gleichermaßen neugierigen Lehrer Ferdinand Stracke geprägt. Er führte einen offenen, diskursorientierten Lehrstuhl. Das gemeinsame Entwerfen und das Arbeiten im Team, in der Profession unabdingbar, entsprach seiner Persönlichkeit. Zudem unterstützte er die Neuorganisation der fächerübergreifenden Ausbildung der Bayerischen Baureferendare an der TUM und blieb somit der Fakultät und dem Lehrstuhl auch nach seiner Emeritierung verbunden.

Mit dem Städtebaulichen Gutachten *Mittlerer Ring*, das er in seinem Stadtplanungsbüro „Stracke & Zurmöhle“ entwickelte, und der *Hochhausstudie* wirkte Ferdinand Stracke maßgeblich an der stadträumlichen und strukturellen Entwicklung Münchens mit. Sein umfassendes Verständnis von Planung und Entwurf sei hier mit einer seiner Aussagen angedeutet: »*Stadtplanung bedarf der Phantasie, sie braucht Kreativität, sie steht im Kontext zur Historie und Morphologie des jeweiligen Ortes und bereitet zugleich dessen Zukunft vor.*« (in: Stracke/Laux, *Stadtwerk*, München 2003). Städtebau war für ihn immer in Geschichte und in Geschichten eingebunden, die er voller Anteilnahme zu erzählen wusste.

Vielfältigen Ämtern und Ehrenämtern widmete sich Ferdinand Stracke mit großem Engagement. Um nur zwei herauszugreifen: 1991–1993 war er Vizepräsident des Bundes Deutscher Architekten BDA, 2002–2009 Vorsitzender der Landesgruppe Bayern der Deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung DASL. Im Jahr 2011 publizierte er seine langjährige Forschung zu Wohntypologien in München: „WohnOrt München. Stadtentwicklung im 20. Jahrhundert“ im Franz Schiermeier Verlag. Es ist ein Standardwerk für alle geworden, die sich mit Wohnungsbau, dessen Typologie und Geschichte in München befassen. 2005 erhielt Ferdinand Stracke für seine herausragenden Leistungen im Städtebau die Leo-von-Klenze-Medaille des Freistaates Bayern.

Ferdinand Stracke hat sechs Jahrzehnte als Architekt und Stadtplaner gewirkt. Er war Autor und Zeuge des stetigen Wandels der zentralen Themen dieses Berufes. Dem sozialen Auftrag des Städtebaus blieb er immer tief verbunden. Menschen, die sich für die Stadt verantwortlich fühlen, ob sie nun vom Fach sind oder Laien, sie alle hat er mit Respekt und Freundlichkeit einbezogen.

Wir vermissen ihn. Er bleibt in unseren Gedanken.

Markus Lanz, Sophie Wolfrum

KLAUS GAHL
* 14.06.1937 † 29.09.2023

Es wirkt nahezu vermessen, denjenigen Mann mit einem Nachruf ehren zu wollen, der in der BWG – neben all seinen Tätigkeiten – berühmt war für seine „Nachworte“. Von den Neujahrsempfängen bis zur jährlichen Verleihung der Gauß-Medaille ließen die mit seiner sonoren Stimme vorgetragenen Reflexionen viele Veranstaltungen besinnlich ausklingen. In den *Jahrbüchern* kann man seine Nachworte nachlesen. Zuletzt wünschte er immer einen guten Nachhause-Weg. – Am 29.09.2023 hat Klaus Gahl selbst den Weg nach Hause angetreten. Er starb mit 86 Jahren in Seesen/Harz, wo er sich von zwei kurz aufeinanderfolgenden Schlaganfällen nicht mehr erholen konnte. Was uns vielleicht etwas trösten mag: Die Gewissheit, sterben zu müssen gehörte für Gahl zu den Grunderfahrungen des Menschen. Sie leitete auch sein Handeln als Arzt und Medizinethiker, für den die Wahrhaftigkeit am Krankenbett an höchster Stelle stand.¹

Klaus P. G. Gahl, Prof. Dr. med., Internist, wurde am 14. Juni 1937 in Todtmoos im Südschwarzwald geboren. Nach dem Marburger Staatsexamen in Medizin, der Promotion 1966 und der Habilitation für Innere Medizin/Kardiologie 1974 war er Oberarzt an der Medizinischen Hochschule Hannover und von 1982 bis 2002 Chefarzt der Medizinischen Klinik II des Städtischen Klinikums Braunschweig (Standort: Salzdahlumer Straße). Jeder hiesige Hausarzt und jede Internistin kennt ihn, wenn er oder sie nicht sogar von Gahl mit ausgebildet wurde. Eines seiner Spezialgebiete war die infektiöse Endokarditis. Den „Begründer des Untersuchungslehrbuches“, wie Gahl den 1989 verstorbenen Kardiologen Prof. Dr. med. Klaus Holldack nannte, ehrte er mit der pflichtgemäßen Fortsetzung und mehrfachen Überarbeitung (11. Aufl. 1990, 15. Aufl. 2009) von dessen Standardwerk *Auskultation und Perkussion – Inspektion und Palpation*. Über die Jahre wurde das Buch zum Abhorchen zusammen mit einem Tonband, dann mit einer Kassette und später einer Audio-CD verlegt: mit Auskultationsbeispielen von Lunge und Herz. Nebenbei erzählt das Lehrbuch eine Mediengeschichte, eine Geschichte des Verschwindens von Tonträgern, denn ab der 16. Aufl. (2014) gab es die Hörbeispiele online. Im Lehrbuch ist der Mann der Nachworte einer der Vorworte, in denen er angesichts der neuen, apparativen diagnostischen Möglichkeiten stets die unmittelbare Anwesenheit des Arztes anmahnt: „Die direkte Krankenuntersuchung ist – neben ihrer diagnostischen Funktion – eine Kommunikationsweise zwischen dem Kranken und dem Arzt. Sie begründet auch das wechselseitige Verhältnis von Vertrauen und Verantwortung.“²

¹ Gahl, Klaus: Grenzerfahrungen in der Begegnung des Arztes mit dem Kranken angesichts des Lebensendes. In: Caroline Welsh/Christoph Ostgathe/Andreas Frewer/Heiner Bielefeldt (Hg.): *Autonomie und Menschenrechte am Lebensende* (141–164). Bielefeld 2016. <https://doi.org/10.14361/9783839437469-007>

² Gahl, Klaus: *Auskultation und Perkussion – Inspektion und Palpation*. Begründet von Klaus Holldack. Stuttgart 152009, S. V.

Die Arzt-Patienten-Beziehung als eine wechselseitige, eine „Gegenseitigkeit“ zu sehen war das zentrale Thema des Neurologen und Philosophen Viktor von Weizsäcker, dessen psychosomatische und anthropologische Lehren Gahl stark beeinflussten. Als Beispiel sei nur genannt das Buch *Gegenseitigkeit. Grundfragen medizinischer Ethik* (hrsg. von Klaus Gahl, Peter Achilles und Rainer-M. E. Jacobi, Würzburg 2008) sowie sein gebündeltes Wissen in der Monographie *Begegnung und Verantwortung. Beiträge zu einer ärztlichen Menschenkunde* (Freiburg 2019). Regelmäßig veröffentlichte er in der Zeitschrift *Ethik in der Medizin*. Gahl war auch Erstunterzeichner der „Göttinger Thesen zur gesetzlichen Regelung des Umgangs mit Patientenverfügung und Vorsorgevollmacht“ (2006).³ Sein Werk umfasst zahlreiche Veröffentlichungen zur Medizin- und Bioethik, zur Phänomenologie sowie zur Medizinischen Anthropologie. Im ethischen Bereich sind seine zentralen Themen die gemeinsame Autonomie von Arzt und Patient, die Sterbehilfe inklusive des Problemfelds der künstlichen Ernährung sowie die Arzt-Patienten-Beziehung unter dem Druck der fortschreitenden Ökonomisierung des Gesundheitswesens; im anthropologischen Bereich das Verstehen von „Kranksein als eine Weise des Menschseins“ (V. v. Weizsäcker).

Gahls Denken hat Schnittstellen zur theologischen Anthropologie. Der ehemalige Villigst-Stipendiat war Initiator der „Braunschweiger Patientenforen Medizinische Ethik“ und langjähriger Motor des Arbeitskreises Medizinethik in der *Abt Jerusalem Akademie* (AJA), begleitet von zahlreichen Vorträgen am Theologischen Zentrum. In der AJA gehörte er über mehrere Amtsperioden dem Konvent unter Leitung des Landesbischofs an. Im Braunschweigischen war er mit seiner Frau *Dr. phil. Hilde Gahl* Förderer von Literatur und Musik. Um nur einige Beispiele zu nennen: Klaus Gahl war engagiertes Mitglied der *Lessing-Akademie*, des „Freundeskreises zur Förderung der Kirchenmusik an Sankt Katharinen e. V.“, der „Freunde der Weltliteratur e. V.“ (Gründungsmitglied) und natürlich des „Vereins der Freunde der BWG e. V.“. Man sah die Gahls häufig als interessierte Zuhörer in den Ring-Vorlesungen der Institute für Germanistik und Philosophie, und insbesondere Klaus Gahl auch in dem einen oder anderen Philosophie-Seminar. Ebenfalls zusammen haben die Gahls unter dem Dach der *Viktor von Weizsäcker-Gesellschaft* seit 2010 in Braunschweig ein jährliches Lese- und Gesprächsseminar zu einem Weizsäcker-Text im Angesicht eines literarischen Textes angeboten. Durch letzteren führte Hilde Gahl als promovierte Germanistin. Dass beide auch stets ein offenes Ohr für ihre Freunde hatten und eine Kinder- und Enkelschar, die über aller Herren Länder verstreut lebt, zusammenhielten, grenzte an ein Wunder. Die Gahls waren immer auf Achse.

³ Neitzke, G.; Charbonnier, R.; Diemer, W.; May, A.T. & Wernstedt, T.: Göttinger Thesen zur gesetzlichen Regelung des Umgangs mit Patientenverfügung und Vorsorgevollmacht. In: *Ethik in der Medizin* 18(2), 2006: 192–194.

In der BWG wurde Klaus Gahl 1997 ordentliches Mitglied der Klasse für Geisteswissenschaften. Von Anfang an war er allen sehr zugewandt und bereit, sich einzubringen. Generell standen sein Gerechtigkeitsinn und sein hoher wissenschaftlicher Anspruch in produktiver Spannung zu seinem Harmoniebedürfnis und seiner Güte. Von beidem profitierte die BWG in besonderem Maße. Gahl kümmerte sich um die Weiterentwicklung der Klasse in zahlreichen Zuwahl-Kommissionen. Von 2011 bis 2020 war er Vizepräsident der BWG und leistete mit den Sekretärinnen die Organisation einer im Rückblick fast endlos erscheinenden Reihe von Vorträgen und Veranstaltungen, manchmal mit seiner Querflöte auch die musikalische Begleitung. Seine Uneigennützigkeit war beispiellos; mit seinem Fahrrad war er bis ins hohe Alter immer schnell zur Stelle, wenn Not am Mann war. In den letzten Monaten seiner Vizepräsidentschaft, während der Hochphase der Corona-Pandemie, übernahm er zudem kommissarisch das Amt des Präsidenten. Hier von lebensrettenden Maßnahmen zu sprechen ist nicht übertrieben. Ausgestattet mit Mundschutz und Desinfektionsmittel scherzte Gahl in der BWG, dass er sich nun fast wieder „wie in der Klinik“ fühle. Die Analogie betraf auch die notwendig gewordene Kommunikation mittels Apparaten, sprich: mit den ungeliebten Videokonferenz-Systemen. Die Maschinen fest im Blick behielt er in seinen Diskussionsbeiträgen für die SYNENZ-Kommission, die 2021 ihren Sammelband vom *Zusammenwirken natürlicher und künstlicher Intelligenz* in Herausgeberschaft von Reinhold Haux und Mitherausgeberschaft von u. a. Klaus Gahl vorlegen konnte. Auf vielfache Weise hat Gahl die BWG geprägt, nicht zuletzt als Begründer und Leiter des weit über die Landesgrenzen hinaus bekannten *Bioethik-Symposiums*, das im Juni 2023 zum 19. Mal stattfand.

Die große Anteilnahme an seinem Tod und der Respekt vor seinem Leben wurde sichtbar bei der Trauerfeier für Klaus Gahl. Sie fand am 8. Oktober 2023, einem sonnigen Sonntag, in der gut gefüllten Kirche St. Katharinen in Braunschweig statt.

Nicole C. Karafyllis und Claus-Artur Scheier

GÜNTER PETER MERKER

* 09.04.1942 † 05.11.2023

Prof. Dr.-Ing. Günter Peter Merker wurde 1942 in Augsburg geboren. Nach einer Lehre zum Werkzeugmacher bei der Firma LIFA in Augsburg von 1956 bis 1960 studierte er von 1960 bis 1964 am Rudolf-Diesel-Polytechnikum Maschinenbau, ebenfalls in Augsburg, welches er mit der Staatlichen Ingenieurprüfung abschloss. Anschließend folgte von 1964 bis 1969 ein Maschinenbau-Studium an der Technischen Universität München, mit Abschluss zum Diplom-Ingenieur.

Nach seinem Studium war Günter Merker an der TU München von 1969 bis 1978 als Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl A für Thermodynamik tätig. Während dieser Zeit folgte 1974 seine Promotion zum Dr.-Ing. im Bereich der Thermodynamik, von 1975 bis 1976 ein Auslandsaufenthalt in den USA als Research Fellow am Department of Chemical Engineering des California Institute of Technology in Pasadena und 1978 die Habilitation im Bereich der konvektiven Wärmeübertragung.

Anschließend wechselte Günter Merker für zwei Jahre in die Industrie, als Fachreferent für Wärmetauscher bei der Motoren- und Turbinen-Union (MTU) München, blieb jedoch zugleich als Privatdozent mit der TU München verbunden.

1980 wurde er Professor für Kältetechnik an der Technischen Universität Karlsruhe.

Von 1986 bis 1994 wechselte er wieder in die Industrie, als Leiter der Hauptabteilung Analytik der Motoren- und Turbinen-Union in Friedrichshafen. Als Außerplanmäßiger Professor, zunächst von 1987 bis 1991 an der TU Karlsruhe und anschließend von 1991 bis 1994 an der TU München, blieb er weiterhin mit der Wissenschaft verbunden.

Schließlich folgte er 1994 einem Ruf an die Leibniz Universität Hannover, auf eine Professur für Verbrennungskraftmaschinen. Mit dieser Professur war die Leitung des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen verbunden, welches ab 1997 in Institut für Technische Verbrennung umbenannt wurde. Dort gestaltete Prof. Merker die Forschung des Institutes neu, mit dem Fokus auf der Verbindung von Experiment, Theorie und numerischer Methoden, insbesondere im Bereich der Einspritzung bei Nutzfahrzeugmotoren. Seine Thermodynamikexpertise war weltweit geschätzt, ebenso seine Lehrbücher, die als hervorragende Werke und Standard für viele Lehrveranstaltungen gelten. Zudem war Prof. Merker von 1999 bis 2003 Dekan der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität. Im Jahr 2000 wurde er als ordentliches Mitglied der Klasse für Ingenieurwissenschaften in die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft aufgenommen.

Ende 2005 ging Prof. Merker in den Ruhestand und zog nach Tettngam am Bodensee. Auch nach seiner Emeritierung war er weiter wissenschaftlich tätig und überarbeitete u. a. als Herausgeber sein Lehrbuch „Grundlagen Verbrennungsmotor“ (inzwischen in englischer und chinesischer Übersetzung erschienen), bei dem er noch eine zehnte, wieder deutlich erweiterte Auflage geplant hatte.

Als besonders bemerkenswert wird bei Prof. Merker seine Verbindung zwischen Universität und Industrie hervorgehoben, dazu seine angebotene Vielzahl an Fächern zur Anwendung der Thermodynamik im Maschinenbau, die er fast alle auch selbst unterrichtete, sowie sein Vorbild-Charakter für eine Klarheit im Denken und Handeln.

Die Braunschweigische Wissenschaftliche Gesellschaft wird Professor Merker ein ehrendes Gedenken bewahren.

Stefan Hartmann, Vorsitzender der Klasse für Ingenieurwissenschaften, und Reinhold Haux, Präsident der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft¹

¹ Wir danken Herrn Kollegen Friedrich Dinkelacker, dem jetzigen Leiter des Instituts für Technische Verbrennung der Leibniz Universität Hannover und Nachfolger von Professor Merker, sehr für die von ihm zur Verfügung gestellten Unterlagen. Sie bildeten die Grundlage für diesen Nachruf.

Zuwahlen 2023

Zu ordentlichen Mitgliedern wurden am 28.04. und 8.12.2023 gewählt:

Klasse für Mathematik und Naturwissenschaften:

Stiesch, Meike, Prof. Dr. med. dent.

Zahnärztliche Prothetik und Biomedizinische Werkstoffkunde, MHH Hannover

Bunjes, Heike, Prof. Dr.

Professorin für Pharmazeutische Formulierungstechnik, Institut für Pharmazeutische Technologie und Biopharmazie, TU Braunschweig

Glaßmeier, Karl-Heinz, Prof. Dr.rer.nat.

Professor, Institut für Geophysik und extraterrestrische Physik, TU Braunschweig

Schulz, Stefan, Prof. Dr.

Professor, Institut für Organische Chemie, TU Braunschweig

Wolf, Lars, Prof. Dr.-Ing.

Professor, Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund, TU Braunschweig

Klasse für Ingenieurwissenschaften:

Gerke, Markus, Prof. Dr.-Ing.

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, TU Braunschweig

Inhaber der Carl-Friedrich-Gauß-Medaille 1949–2023

- 1949 *Walter Reppe* †, Dr. phil., Dr. phil. nat. h. c., Dr.-Ing. E.h., Honorarprofessor der Universität Mainz und der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1950 *Arvid Hedvall* †, fil. dr., Dr. phil. h. c., Dr.-Eng. h. c., Dr. Techn. h. c., em. o. Professor für Silikatchemie der Technischen Hochschule Göteborg/Schweden.
- 1951 *Wilhelm Nusselt* †, Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Theoretische Maschinenlehre an der Technischen Hochschule München.
- 1952 *Erwin W. Müller* †, Dr.-Ing. habil., Dr. rer. nat. h. c., Dr. h. c., Evan-Pugh Res., Professor an der Pennsylvania State University, University Park, Penn./USA.
- 1953 *Gustav Wolf* †, Dr.-Ing. E. h., ProfessorMünster.
- 1954 *Max Strutt* †, Dr. techn., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Höhere Elektrotechnik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich/Schweiz.
- 1955 *Fritz Arndt* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h. c., Dr. h. c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Breslau, Honorarprofessor an der Universität Hamburg.
- 1955 *Pascual Jordan* †, Dr. phil., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Hamburg.
- 1956 *Ulrich Finsterwalder* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., München.
- 1957 *Georg Sachs* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Metallurgie an der Syracuse University, Syracuse, N.Y./USA.
- 1958 *Werner Schmeidler* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Mathematik an der Technischen Universität Berlin.
- 1959 *Hans Brockmann* †, Dr. sc. nat. habil., Dr. rer. nat. h. c., em. o. Professor für Organische Chemie an der Universität Göttingen.
- 1960 *Theodor von Karman* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. rer. nat. h. c. mult., LL. D., Professor am California Institute of Technology, Pasadena, Calif./USA.

- 1961 *Kurt Paul Klöppel* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Statik und Stahlbau an der Technischen Hochschule Darmstadt.
- 1962 *Walter Schottky* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. rer. nat. h. c., Dr. techn. h. c., em. o. Professor für Theoretische Physik an der Universität Erlangen.
- 1963 *Gottfried Köthe* †, Dr. phil., Dr. h. c., Dr. rer. nat. h. c. mult., em. o. Professor für Angewandte Mathematik an der Universität Heidelberg.
- 1964 *Carl Wagner* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h. c., Dr.-Ing. E. h., Professor und vormals Direktor des Max-Planck-Instituts für Physikalische Chemie in Göttingen.
- 1965 *Albert Betz* †, Dr. phil., Dr.-Ing. E. h., Dr. sc. techn. h. c., Professor und vormals Direktor der Aerodynamischen Versuchsanstalt und des Max-Planck-Instituts für Strömungsforschung in Göttingen.
- 1966 *Wilhelm Becker* †, Dr. phil., Dr. h. c., em. o. Professor und Direktor der Astronomisch-Meteorologischen Anstalt der Universität Basel/Schweiz.
- 1967 *Henry Görtler* †, Dr. phil. habil., LL. D. h. c., em. o. Professor für Mathematik und vormals Direktor des Instituts für Angewandte Mathematik der Universität Freiburg i. Br.
- 1968 *Egon Orowan* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass./USA.
- 1969 *E. Arne Bjerhammar* †, tekn. dr., Professor für Geodäsie an der Kungl. Tekniska Högskolan in Stockholm/Schweden.
- 1970 *Elie Carafoli* †, Dr. rer. nat., Professor für Aero-Gas-Dynamik am Polytechnischen Institut Bukarest und vormals Direktor des Institut de Mécanique des Fluides „Traian Vuia“ in Bukarest/Rumänien.
- 1971 *Walter Dieminger* †, Dr. rer. techn., apl. Professor für Geophysik an der Universität Göttingen und vormals Direktor des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Lindau/Harz.
- 1972 *Hubert Rüsçh* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Massivbau an der Technischen Hochschule München und vormals Direktor des Amtlichen Materialprüfungsamtes für das Bauwesen.

- 1973 *Viktor Gutmann* †, Dr. techn., Ph.D., ScD, Dr. rer. nat. h. c., Dr. Sc. h. c., em. o. Professor für Anorganische Chemie an der Technischen Universität Wien/Österreich.
- 1974 *Friedrich Tamms* †, Dr. h. c., Professor, Beigeordneter der Stadt Düsseldorf (Stadtbaurat i.R.), Freischaffender Planer.
- 1975 *Sir Michael James Lighthill* †, FRS, FRAeS, Hon. D. Sc. mult., Professor für Mathematik an der University of Cambridge/Großbritannien.
- 1977 *Walter Maurice Elsasser* †, Dr. phil., o. Professor für Geophysik an der Johns Hopkins University, Baltimor, Maryland/USA.
- 1977 *Helmut Moritz* †, Dr. techn., Dr.-Ing. E. h., o. Professor für Geodäsie an der Technischen Universität Graz/Österreich.
- 1977 *László Fejes Tóth* †, Dr., Professor und Direktor des Mathematischen Forschungsinstituts der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest/Ungarn.
- 1978 *Ulrich Grigull* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., em. o. Professor für Thermodynamik an der Technischen Universität München.
- 1979 *Wolf Freiherr von Engelhardt* †, Dr. phil., em. o. Professor für Mineralogie und Petrographie an der Universität Tübingen.
- 1980 *Hans Kuhn* †, Dr. phil., Dr. rer. nat. h. c., Professor und vormals Direktor am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen.
- 1981 *Martin Kneser* †, Dr. rer. nat., o. Professor für Mathematik an der Universität Göttingen.
- 1982 *Walter Burkert* †, Dr. phil., o. Professor für Klassische Philologie an der Universität Zürich/Schweiz.
- 1983 *Leopold Müller* †, Dr. techn., Dr. mont. h. c., Honorarprofessor für Felsmechanik an der Universität Salzburg/Österreich.
- 1984 *Heinz Beneking* †, Dr. rer. nat., o. Professor und Direktor des Instituts für Halbleitertechnik an der RWTH, Aachen.
- 1985 *Gerhard Ertl*, Dr. rer. nat., Dr. h. c. mult., Professor und Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin.

- 1986 *Arno Borst* †, Dr. phil., o. Professor für Mittelalterliche Geschichte an der Universität Konstanz.
- 1987 *Olgierd Cecil Zienkiewicz* †, FRS, Ph.D., D.Sc., Hon. D.Sc. mult., Professor of Civil Engineering an der University of Wales/Swansea/Großbritannien.
- 1988 *Heinz Brauer* †, Dr.-Ing., Professor für Chemische Ingenieurtechnik an der Technischen Universität Berlin.
- 1989 *Herbert Walther* †, Dr. rer. nat., Professor für Experimentalphysik an der Universität München und Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik in Garching.
- 1990 *Raymond Klibansky* †, Dr. phil., Dr. phil. h. c., Professor der Philosophie (Logik und Metaphysik) an der McGill University in Montreal/Kanada und Fellow des Wolfson College Oxford.
- 1991 *Wilfried B. Krätzig* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., Professor für Ingenieurmechanik an der Ruhr-Universität Bochum.
- 1992 *Ernst-Dieter Gilles* †, Dr.-Ing., Professor für Meß- und Regelungstechnik an der Universität Stuttgart.
- 1993 *Hans-Heinrich Voigt* †, Dr. rer. nat., em. o. Professor für Astronomie und Astrophysik an der Universität Göttingen.
- 1994 *Josef Fleckenstein* †, Dr. phil., em. o. Professor für Mittelalterliche Geschichte, zuvor Direktor des Max-Planck-Instituts für Geschichte in Göttingen.
- 1995 *David G. Crighton* †, FRS, Head of Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge/Großbritannien.
- 1996 *Gerhard Frey*, Dr. rer. nat., Dr. h. c. mult., Professor für Mathematik an der Universität Essen.
- 1997 *Arnold Esch*, Dr. phil., Professor für Mittelalterliche Geschichte, Direktor des Deutschen Historischen Instituts in Rom/Italien.
- 1998 *Christian Menn* †, Dr.-Ing., Dr.-Ing. E. h., em. Professor für Konstruktiven Ingenieurbau an der ETH Zürich/Schweiz.

- 1999 *Christian Wandrey*, Dr. rer. nat., Professor für Biotechnologie, Universität Bonn, Direktor des Instituts für Biotechnologie des Forschungszentrums Jülich.
- 2000 *Klaus J. Hopt*, Dr. jur., Dr. phil., Dr. iur. h. c. mult., Professor für ausländisches und internationales Privatrecht, Universität Hamburg, Direktor des Max-Planck-Instituts für ausländisches und internationales Privatrecht, Hamburg.
- 2001 *Robert Piloty* †, Dr.-Ing., Professor em. für Datentechnik an der Technischen Universität Darmstadt.
- 2002 *Wolfgang Krätschmer*, Dr. rer. nat., Professor für Kern- und Astrophysik am Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.
- 2003 *Niklot Klüßendorf*, Dr. phil., apl. Professor für Numismatik und Geldgeschichte an der Philipps Universität, Marburg.
- 2004 *Joachim Milberg*, Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. mult., Professor für Maschinenbau und Produktionswissenschaften, München.
- 2005 *Klaus von Klitzing*, Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult., Professor für Festkörperphysik, Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart, Honorarprofessor an der Universität Stuttgart.
- 2006 *Peter Bürger* †, Dr. phil. habil., Professor em. für Literaturwissenschaft (Französisch) und Ästhetische Theorie an der Universität Bremen.
- 2007 *Herbert A. Mang*, Dipl.-Ing. Dr. techn. Ph.D. Dr. h. c. mult., Ordentlicher Universitäts-Professor für Elastizitäts- und Festigkeitslehre an der Technischen Universität Wien/Österreich.
- 2008 *Rudolf K. Thauer*, Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. mult., Professor für Mikrobiologie, Direktor des Max-Planck-Instituts für terrestrische Mikrobiologie, Marburg.
- 2009 *Walther Ludwig*, Dr. phil. Dr. h. c., Professor em. für Klassische Philologie an der Universität Hamburg.
- 2010 *Klaus Streubel*, Dr. rer. nat., LED-Technologie, Leiter Forschung und Technologie der Osram GmbH, Augsburg.
- 2011 *Angela D. Friederici*, Dr. phil. Dr. h. c., Professorin für Neuropsychologie und Direktorin des Max-Planck-Instituts für Kognitions- und Neurowissenschaften, Leipzig.

- 2012 *Werner Oechslin*, Dr. phil. Dr. h. c. mult., Professor em. für Geschichte und Theorie der Architektur an der ETH Zürich, Schweiz.
- 2013 *Wolfgang Schröder*, Dr.-Ing., Professor für Strömungsmechanik an der RWTH Aachen.
- 2014 *Klaus Müllen*, Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult., Prof. für Organische Chemie, Direktor des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung, Mainz.
- 2015 *Johannes Fried*, Dr. Dr. h. c., Prof. em. für Mittelalterliche Geschichte an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt am Main.
- 2016 *Reiner Rummel*, Dr.-Ing. Dr. h. c. mult., Prof. em. für Geodäsie an der TU München.
- 2017 *Antje Boetius*, Dr. rer. nat., Professorin für Geomikrobiologie am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie, Universität Bremen und Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.
- 2018 *Paul Kirchhof*, Dr. iur. Dr. h. c. mult., Prof. em. für Öffentliches Recht und Steuerrecht, Professor Distinctus der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, Bundesverfassungsrichter a. D.
- 2019 *Manfred Curbach*, Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h., Prof. und Institutsdirektor für Massivbau, Technische Universität Dresden.
- 2020 *Emmanuelle Charpentier*, Dr. rer. nat. Dr. h. c. mult., Professorin und Gründungsdirektorin der Max-Planck-Forschungsstelle für die Wissenschaft der Pathogene, Berlin.
- 2021 *Bénédictte Savoy*, Prof. Dr., Professorin für Kunstgeschichte der Moderne an der Technischen Universität Berlin und Professorin für die Kulturgeschichte des europäischen Kunsterbes des 18. bis 20. Jahrhunderts am Collège de France, Paris, Chaire internationale.
- 2022 *Sebastian Thrun*, Prof. Dr., CEO, Kitty Hawk Coop. Palo Alto, Mitbegründer und Chairman, Udacity, Mountain View.
- 2023 *Maryna Viazovska*, Prof. Dr., Professorin an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Chaire d'arithmétique.