

Klaus Dethloff

Unberechenbares Klima

Ursachen und
Unsicherheiten
des Klimawandels

SACHBUCH



Springer

Unberechenbares Klima

Klaus Dethloff

Unberechenbares Klima

Ursachen und Unsicherheiten des
Klimawandels

 Springer

Klaus Dethloff
Kühlungsborn, Deutschland

ISBN 978-3-662-64899-5 ISBN 978-3-662-64900-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64900-8>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Covermotiv: © Autor; aus Orgis, T., 2013, Unstetige Galerkin-Diskretisierung niedriger Ordnung in einem Multiskalenmodell der atmosphärischen Dynamik, Diss. Universität Potsdam, Abb. C.3. Wirbelentwicklung aus Rauschen im Horizontalschnitt der Wirbelstärke in 4 km Höhe nach 7 Tagen; Kontourintervall 10^{-4}s^{-1}
Covergestaltung: deblik, Berlin

Planung/Lektorat: Simon Shah-RohlfS

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Ich danke dem National Center for Environmental Prediction NCEP/NCAR für die Nutzung von Reanalyse- und operationellen Daten (<http://psl.noaa.gov/NCEP/NCAR> Reanalysis Data) sowie dem Climate Change Institute, University of Maine (<https://ClimateReanalyzer.org>), für die Nutzung der dort verfügbaren Reanalysedaten, die auch die ECMWF-Reanalysedaten beinhalten. Mein Dank gilt auch dem European Center for Medium-Range Weather Forecast ECMWF (<https://apps.ecmwf.int/datasets>) und dem Meereisportal (<https://www.meereisportal.de>) des Helmholtz-Verbundes „Regionale Klimaänderungen und Mensch“ (REKLIM).

Dr. Dörthe Handorf und Dr. Annette Rinke danke ich für viele Jahre gemeinsamer Forschungsarbeit im AWI Potsdam und Dr. Thomas Orgis für die Coverabbildung.

Gyöngyi Dethloff danke ich für einzigartige Unterstützung beim Schreiben dieses Buches während der Coronazeit in Miske, Kühlungsborn und Potsdam. Birgit Dethloff, Claudia Mitzschke und Dr. Thomas Dethloff verdanke ich wertvolle Hilfe.

Prof. Ernst Augstein danke ich für Förderung und intellektuelle Ermutigung.

Prof. Peter Hupfer danke ich für akademische Unterstützung.

Simon Shah-Rohlf vom Springer-Verlag verdanke ich kompetenten Rückhalt.

Kühlungsborn, Potsdam und Miske
im November 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Vorspann	1
	Literatur	21
2	Nichtlineare Mechanismen im Klimasystem	23
	Literatur	43
3	Strahlströme und atmosphärische Zirkulation	45
	Literatur	61
4	Planetare Wellen als Schwungräder der Zirkulation	63
	Literatur	75
5	Wetterextreme durch Hoch- und Tiefdruckgebiete	77
	Literatur	94
6	Atmosphärische Fernverbindungsmuster	97
	Literatur	111
7	Arktisches Meereis und Zirkulation des Ozeans	113
	Literatur	126
8	Arktische Schmelze und Zukunft des Meereises	129
	Literatur	146

VIII Inhaltsverzeichnis

9	Wechselwirkung der atmosphärischen Stockwerke	149
	Literatur	161
10	Wechselwirkung der Arktis mit den mittleren Breiten	163
	Literatur	170
11	Blockierungslagen, Hitzeglocken und Starkregen	173
	Literatur	195
12	Komplexitätsreduktion in Klimamodellen	197
	Literatur	210
13	Planetare Wellen im Klima der Zukunft	213
	Literatur	221
14	Natürliche Klimavariabilität auf Dekaden	223
	Literatur	234
15	Historische Klimaanomalien und Wetterextreme	237
	Literatur	246
16	Grenzen der Klimavorhersagbarkeit	249
	Literatur	258
17	Wetter- und Eisvorhersagen in der Arktis	261
	Literatur	272
18	Das Driftschollenexperiment mit der Polarstern	275
	Literatur	287
19	Technokratische Wege zur Klimakontrolle	289
	Literatur	298
20	Nachklang	301
	Literatur	312
	Erläuterung einiger Begriffe	315
	Stichwortverzeichnis	317

Erläuterung der Acronyme

AARI (AC) ³	Arctic and Antarctic Research Institute Atmospheric and Surface Processes, and Feedback Mechanisms Determining Arctic Amplification
AD	Arctic Dipole pattern
AGCM	Atmospheric General Circulation Model
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation
AO	Arctic Oscillation
AR4, AR5	Assessment Reports
ARCMIP	Arctic Regional Climate Modell Intercomparison Project
ARCROSE	Arctic Research Collaboration for Radiosonde Observing System Experiment
AWI	Alfred-Wegener-Institut
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CCSM4	Community Climate System Model 4 of NCAR
CFS	Climate Forecast System
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project 5
CMIP6	Coupled Model Intercomparison Project 6
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment
DWD	Deutscher Wetterdienst
DMS	Dimethylsulfid
DJF	December, January, February
ECHAM	Atmosphärenmodell des MPI Hamburg

X Erläuterung der Acronyme

EC-Earth	European Community Coupled Climate System Model
ECMWF	European Center for Medium Range Forecast
EKE	Eddy Kinetic Energy
EOF	Empirical Orthogonal Function
ERA-20C	Atmospheric reanalysis of the 20th century from 1900 to 2010
ERA-Interim	Global atmospheric reanalysis from 1979 to 2019
ERA5	Global reanalysis from 1979 to present
ESRL	Earth System Research Laboratory
GCM	General Circulation Model
GTS	Global Telecommunication System der WMO
HAPPI	Half a degree Additional warming Prognosis and Projected Impacts
IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change
IPSL-CM6	Institut Pierre Simon Laplace climate model
IPY	International Polar Year
JJA	June, July, August
Jetstream	Strahlstrom
LES	Large Eddy Simulation
MCA	Maximum Covariance Analysis
MPI	Max-Planck-Institut
MOSAiC	Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate
MSLP	Mean Sea Level Pressure
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NAO	North Atlantic Oscillation
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NP	North Pole Drifting station
OGCM	Oceanic General Circulation Model
PDO	Pacific Decadal Oscillation
PIOMAS	Pan-Arctic Ice Ocean Modeling and Assimilation System
PNA	Pacific North America Pattern
PSC	Polar Stratospheric Clouds
RASM	Regional Arctic System Model
RCP8.5	Radiative Concentration Pathway
SHEBA	Surface Heat Budget of the Arctic Ocean
Seamless predictions	Nahtlose Vorhersagen
SOP	Special Observing Periods
Stormtrack	Zyklonenzugbahn
SST	Sea Surface Temperature
T15, T21	Truncation und Abbruch der spektralen Modenentwicklung bei Wellenzahl 15 oder 21
Vorticity	Wirbelstärke
YOPP	Year of Polar Prediction



1

Vorspann

Hinweisfenster

Die wissenschaftlich basierten Resultate des Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC Reports (2021) zu den Ursachen des Klimawandels (Masson-Delmotte et al., 2021) bilden in einer Welt mit begrenzten Ressourcen und einer stetig wachsenden Bevölkerung eine wichtige Grundlage für politische Regulierungs- und Anpassungsstrategien. Globale und regionale Klimamodelle stellen die wichtigsten Quellen zur Abschätzung zukünftiger Klimaänderungen durch anthropogene Faktoren, insbesondere die Zunahme der CO₂ Konzentrationen, sowie durch intern generierte Variabilität dar. Die wesentlichen Fakten zum menschlichen Einfluss auf den Klimawandel sind seit mehreren Jahrzehnten bekannt. Divergierende Interessen in einer multipolaren Welt und fehlende Vollzugsgewalt der Vereinten Nationen haben bisher verhindert, die existenziellen Probleme bei der Bewahrung der menschlichen Lebensgrundlagen auf dem Planeten Erde zu lösen. Der europäische „Grüne Deal“ ist ein unerlässlicher Schritt zur Reduktion der CO₂-Konzentrationen in Europa bis 2050, zur Dekarbonisierung der Wirtschaft und deren klimaneutralen Umbau. Die Schulterung der dabei auftretenden Kosten wird neue soziale Spannungen und politische Probleme erzeugen, die das gigantische Klimarettungsprojekt verhindern könnten. Vor dem Abschied von der Kohle-, Öl-, Gas- und Atomenergie müsste zudem eine ausreichende Versorgung mit nichtfossilen Energieträgern aufgebaut werden, woran es selbst in entwickelten Industriestaaten wie Deutschland mangelt. Klimaprojektionen zeigen, dass sich das

anthropogene Signal ab Mitte des 21. Jahrhunderts aus der Bandbreite der natürlichen Klimavariabilität abheben wird. Als Folge der natürlichen Variabilität weisen die Klimaprojektionen für die verschiedenen geografischen Regionen jedoch große Unsicherheiten auf. Diese müssen durch Verbesserung der Modelle weiter reduziert werden, um sie als Wegweiser für politisches Krisenmanagement einsetzen zu können. Die den Klimawandel betreffenden wissenschaftlichen Unsicherheiten insbesondere im Zusammenhang mit dynamischen Änderungen der atmosphärischen Zirkulation werden in der Öffentlichkeit weitestgehend ignoriert. Die Klimawissenschaft muss aber wegen ihrer gesellschaftlichen Relevanz ungefiltert die bestehenden Unsicherheiten bewerten. Die auf unsichere Klimaszenarien aufsetzenden politischen Handlungsoptionen sind deshalb kritisch und im Bewusstsein ihrer Fehlbarkeit zu hinterfragen.

„In das Künftige dringt kein sterblicher Blick.“ (Sophokles)

Alle vorliegenden Beobachtungsdaten und State-of-the-Art-Modellsimulationen dokumentieren die Zerbrechlichkeit und Gefährdung des Klimasystems der Erde durch menschliche Einflüsse als Folge von klimaschädlichen Substanzen, insbesondere durch die Treibhausgase Kohlendioxid und Methan, durch Sulfataerosole und die Umstellung des hydrologischen Wasserkreislaufs. Hasselmann (1993) und Hegerl et al. (1996) haben bereits vor drei Jahrzehnten mit einer optimalen „Fingerprintmethode“ nachgewiesen, dass die Zunahme der CO₂-Konzentrationen mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit an der Veränderung der nordhemisphärischen bodennahen Temperaturmuster beteiligt ist. Stocker et al. (2013), Hoegh-Guldberg et al. (2018) und Masson-Delmotte et al. (2021) haben in Sachberichten des IPCC den Wissensstand zum Klimasystem und zur Kryosphäre dokumentiert und Überblicke zum Einfluss des Klimawandels auf Naturgefahren und menschliche Lebensbedingungen für das angestrebte 1,5°C-Klimaszenario geliefert. Weizsäcker et al. (2019) beschreiben die aus wissenschaftlichen Zukunftsszenarien der erwarteten Klimaänderung erforderlichen politischen und wirtschaftlichen Kurskorrekturen und plädieren für die Stabilisierung der Weltbevölkerung nicht nur aus ökologischen, sondern auch ökonomischen und sozialen Gründen.

Diese können mit der von Huxley (1960) beschriebenen Gefahr des Totalitarismus kollidieren, die Herausforderungen des Klimaschutzes in das Gewand einer existenziellen Krise und Bedrohung zu kleiden, die der Politik legitimiert durch wissenschaftliche Experten einen Macht- und

Gestaltungszuwachs sichert. Dieses Szenario und die Unsicherheit der dabei verwendeten Modellszenarien manifestierte sich bereits exemplarisch in der Coronapandemie 2020/2021. Dabei werden mit wissenschaftlichen Modellszenarien Ängste geschürt, die ohne politische Steuerung durch die uns beherrschenden Eliten in Katastrophen münden würden. Eine auf diesen Szenarien gründende Expertenallianz nimmt für sich in Anspruch, das Wissen zu besitzen, wie man das gesellschaftliche und individuelle Leben steuern und regulieren muss, um den Klimaschutz und die Lebensbedingungen zukünftiger Generationen zu sichern, hinter denen individuelle und demokratische Grundrechte zurücktreten müssen.

Wie Headrick (2021) ausführt, konsumierten noch Anfang des 20. Jahrhunderts nur die reichen Eliten. Ab Mitte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich in den USA und Westeuropa jedoch ein Konsum der Massen mit Massenproduktion und riesigem Ressourcenverbrauch, der nach dem Fall der Mauer 1989 auch auf Osteuropa, China und andere Länder Asiens übergriff. Dieses Wachstumsmodell geht mit einem erhöhten Ressourcenverbrauch einher und erfordert zur Versorgung der stetig wachsenden Bevölkerung eine industrielle Landwirtschaft mit verstärkter Chemisierung und unglaublich hohem Wasser- und Energieverbrauch. Der globale Weg zu einer Massenkonsumgesellschaft hat planetare Auswirkungen auf die Lebens- und Klimabedingungen auf der Erde, die bereits seit Anfang der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts in den IPCC-Berichten aufgezeigt wurden.

Deshalb bestreitet niemand die Notwendigkeit politischen Handelns, um dem Klimawandel durch Nachhaltigkeit und Transformation der Wirtschaft entgegenzuwirken und zur Klimaneutralität zu gelangen, wie es die Europäische Union mit ihrem „Grünen Deal“ vorschlägt. Dabei hat Deutschland die Kernenergie ins geschichtliche Endlager verbannt, während Osteuropa und Frankreich diese wegen ihrer günstigeren CO₂-Bilanz als eine Übergangstechnologie für die nahe Zukunft betrachten. Die gegenwärtige Kommunikation zum Klimawandel mit Alarmismus vermittelt kein realistisches Bild der Situation und überhöht die Gefahren durch Extreme wie Hitzewellen und Starkregen in Mitteleuropa in einer durch wissenschaftliche Ergebnisse und Datenreihen nicht gedeckten Art und Weise. Klimaänderungen haben mit komplexen, nichtlinearen Wechselwirkungsprozessen im Erdsystem zu tun, die zu unsicheren Klimaszenarien der Zukunft für die verschiedenen geografischen Regionen führen. Deshalb ist eine monokausale Betrachtung, die durch Reduktion des Treibhausgases Kohlendioxid die Begrenzung des Klimawandels verspricht, irreführend. Auch in einer CO₂-reduzierten Atmosphäre werden weiterhin Unwetter, Flut- und

Naturkatastrophen sowie Änderungen in den hemisphärischen Zirkulationsmustern auftreten. Die politischen Eliten setzen statt Investitionen in die Anpassung an den unvermeidbaren Klimawandel beim Klimaschutz ausschließlich auf CO₂-Reduktion. Diese eingeschränkte Herangehensweise verspricht die Lösung aller Probleme durch CO₂-Neutralität und verhindert den Blick dafür, dass Klimaschutz, Biodiversität und soziale Gerechtigkeit zusammen betrachtet werden müssten. Ein aktuelles Beispiel für Klimaalarmismus und Populismus findet man bei Vargas (2021).

Bereits in den berühmten Geschichten der Bibel, dem religiösen und geschichtlichen Zeugnis der Menschheit, spielen Wetter- und Klimaextreme eine große Rolle. Die Sinnfluterzählung und die Rettung der Menschen- und Tierwelt auf der Arche Noah steht symbolisch für die Überlebenden von Katastrophen und Epidemien in der Menschheitsgeschichte. Danach schließt Gott mit Noah, dessen Söhnen und allem Getier einen von van Schaik und Michel (2020) beschriebenen Vertrag: *„Solange die Erde steht, soll nicht aufhören Saat und Ernte, Frost und Hitze, Sommer und Winter, Tag und Nacht ..., und hinfort soll keine Sinnflut mehr kommen ..., die die Erde verderbe.“*

Das realistische Schreckgespenst eines Klimakollaps infolge menschlicher Einflüsse bestimmt die Diskussion im Wertekosmos der Wissensgesellschaft und zwingt diese zu einer Dekarbonisierung ihres Wirtschaftssystems durch einen „Ökokapitalismus“. Dabei stellen sich Fragen zu den Grenzen der gegenwärtigen Lebens- und Reproduktionsweise, die sich in der Wechselwirkung von Klima- und Ökologie-, Wirtschafts- und Gesundheitskrisen manifestieren und widersprüchliche Antworten zu deren Bewältigung generieren. Hierbei tritt Klimapopulismus mit teilweise religiöser Inbrunst und politischem Zeigefinger auf sowie mit Analysen und Reportagen zum Klimawandel, häufig weit weg von den Fakten. Diese betreffen Aussagen über wissenschaftlich umstrittene und unsichere Hypothesen der Klimaforschung, wie Strahlungsschwankungen der Sonne, den sich abschwächenden Golfstrom, den mäandrierenden troposphärischen Jetstream und die Zunahme von Wetterextremen. Dabei übernehmen Wissenschaftler statt unabhängiger Expertenanalyse in den Medien manchmal die Rolle von politischen Botschaftern und Klimaaktivisten. Diese nutzen ihre teilweise durch öffentliche Mittel finanzierte privilegierte Stellung mit einer Belehrungs- und Erziehungsattitüde zur Kommunikation von selektiven Ansichten, die nicht die erforderliche Breite der wissenschaftlichen Meinungen zu den komplexen Ursachen und den damit verbundenen Unsicherheiten des Klimawandels abbilden. Die Klimadebatte zeigt anschaulich, dass die herrschenden Eliten wissenschaftliche und politische Probleme mit größeren und zentralisierten Institutionen durch „Think-Big“

statt „Think-Deep“ lösen wollen. Diese setzen auf Meinungsbildung durch Autorität und Konsens von großen Teams, wie man es auch in den IPCC Berichten und der exponentiellen Zunahme von Koautoren weitgehend ohne selbstkritische Reflexionen beobachten kann. Während sich Physiker der ungelösten Probleme von Makroturbulenz und deterministischem Chaos bewusst sind, werden Klimamodellszenarien in der durch die Medien kontrollierten Öffentlichkeit kritiklos für bare Münze genommen und deren Unsicherheiten völlig ignoriert. In der europäischen Klimaforschung müssen beim gnadenlosen Kampf um Drittmittel sogar die Antragsteller Versprechungen und geschönte Übertreibungen in den Forschungsanträgen formulieren, denen sie selbst nicht glauben.

Huxley (1960) und Kaku (2019) beschreiben die in den kommenden Jahrzehnten aus menschlicher Borniertheit zu erwartenden Bedrohungen, nämlich die globale Klimaerwärmung, die atomaren Massenvernichtungswaffen, die biologischen Krankheitserreger wie in der Covidviruspandemie und die stetig anwachsende Erdbevölkerung, die die irdischen Vorräte überbeanspruchen und zu einem ökologischen Armageddon führen könnten. Vor diesem Hintergrund darf eine Diskussion über die Unsicherheiten des gegenwärtigen Klimawandels nicht ausgeklammert werden, selbst wenn diese nicht den von elitären Deutungsexperten vorgegebenen Denkmustern entspricht. Bei der Einwerbung von Drittmitteln in der europäischen und deutschen Klimaforschung herrschte bereits seit der Jahrhundertwende die Auffassung vor, im Besitz der Klimawahrheit zu sein und dass es nur noch um die Verifizierung des menschengemachten Klimawandels geht. Diese Sicht führte dazu, dass die politische Zielsetzung der Begrenzung des Klimawandels selbst Modellweiterentwicklungen oder alternative Forschungsansätze zum Verständnis nichtlinearer Systeme unter Rechtfertigungsdruck setzte und eine zunehmende Heuchelei der Wissenschaft bei der Einwerbung von Drittmitteln bewirkte.

In diesem Buch wird der gegenwärtige Stand des Wissens und Nichtwissens zum Klimawandel auf der Basis von globalen Datensätzen und Modellsimulationen beschrieben und der schmale Grat zwischen übertriebener Klimaapokalypse auf der einen und Verharmlosung auf der anderen Seite aufgezeigt. Das Klimasystem ist trotz aller Verständnisfortschritte weiterhin ein nichtlineares, komplexes und unverstandenes System voller Unsicherheiten, in dem großer wissenschaftlicher Forschungsbedarf besteht. Die offenen Forschungsfragen im Klimasystem sind aufs Engste mit politischen Debatten und Problemen verknüpft, die die Kontrolle der Erderwärmung durch die Industrienationen umfassen. Das betrifft die Alternativen der Politik mit einem kurzfristigen Fahren auf Sicht oder langfristigen Systemumbauten zu sozial-ökologischen Marktwirtschaften oder zu staatskapitalistischen Wirtschaftssystemen in einer multipolaren Welt.

Die politische Komponente

Die zunehmenden Probleme der Menschheit im Zusammenleben auf diesem Planeten erfordern politische Dialoge mit vielen Beteiligten und wissenschaftliche Beratung ohne Scheuklappen. Purdy (2020) zeigt auf, dass unser individuelles Verhalten wie auch das der international agierenden Großkonzerne eine unerträgliche Belastung der irdischen Systeme bedeutet. Die 2017 an die Menschheit ausgesprochene Warnung vor dem Klimawandel von über 15.000 Wissenschaftlern aus 184 Ländern sieht er dualistisch als dringlich und gegenstandslos an, denn die Welt ist gespalten und ungleich. Das Öko- und Klimasystem gekoppelt mit weiteren planetaren Systemen ist nicht in der Lage, Milliarden Menschen einen Lebensstil ohne Einschränkung und Verzicht zu gewährleisten. Auf allen Kanälen klagt das „schnatternde Weltgewissen“, findet aber keine realistischen Wege zu einem globalen Wohlergehen, von Purdy als „Commonwealth“ bezeichnet. Die Erde verfügt nur über endliche Ressourcen, und solange der Energiebedarf der Menschheit hauptsächlich aus fossilen Energiequellen stammt, wird der ungesteuerte Ressourcenverbrauch die Atmosphäre, die Ozeane und die Böden weiterhin in Müllhalden verwandeln.

Aus diesen Gründen sind wir Zeugen einer Verurteilungsdiskussion der Protagonisten und Eliten über die Ursachen der globalen Klimakrise, in deren Fokus die ökologischen Unzulänglichkeiten des gegenwärtigen Wirtschaftssystems mit seinem Wachstumsdiktat stehen. Um einen Klimakollaps zu verhindern, aber gleichzeitig den sozialen Frieden im Sinne eines globalen „Commonwealth“ nach Purdy (2020) zu erhalten, ist ein Gleichgewicht zwischen ökologischen und ökonomischen Interessen erforderlich. Dies erfordert, wirtschaftliche Dynamik mit ökologischen Konzepten zu erreichen, um Wohlstand zu generieren, der die Sozialsysteme finanzieren und die unglaubliche Armut in vielen Regionen der Erde durch Arbeit für die Masse der Bevölkerung verringern und Aufstiegschancen bieten kann. Ob der Spagat einer Versöhnung von Ökologie und Wirtschaft zu einem klimaneutralen Ökokapitalismus ohne eine entscheidungsberechtigte Exekutive wie in der Coronapandemie überhaupt gelingen kann, ist weiterhin völlig umstritten. Wie Koppetsch (2021) ausführt, sind nicht nur privilegierte Nationalstaaten, sondern auch privilegierte Bevölkerungsschichten mit einem größeren ökologischen Fußabdruck die Hauptverursacher der globalen Klimaprobleme. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit eines sozial gerechten Klimaschutzes, bei dem nicht die ärmeren Staaten und Bevölkerungsschichten den Gürtel enger schnallen müssen.

Bei der Entwicklung umweltfreundlicher Technologien für Klimaschutz und beim notwendigen Übergang zu einer karbonfreien Wirtschaft kommt der Wissenschaft eine bedeutende Rolle zu, die ohne politische Vorgaben

die wirksamsten Lösungen finden muss. Wir erleben bei der Bevorzugung und Diskussion der E-Mobilität, dass der Denk- und Machbarkeitskorridor politisch eingeengt wird und in der Folge kollektive Irrtümer entstehen können. Ein nachdenkenswertes Beispiel dafür ist die durch ein EU-Konsortium lange alimentierte Entwicklung des Airbus 380, die einer völlig verfehlten Langfriststrategie im Luftverkehr folgte.

Immer noch stellt Containerverschiffung die bevorzugten Transportwege der globalisierten Wirtschaft dar. Eine Reduktion der Transporte über die Ozeane mit Schiffsdieseln durch eine Regionalisierung der Wirtschaft könnte einen bedeutsamen Beitrag zur Senkung von CO₂-Emissionen leisten. Statt sich diesem bedeutsamen Problem zuzuwenden, schießen heuchlerische Appelle für Nachhaltigkeit und Aktionspläne zum Klima- und Umweltschutz in Unternehmen wie Pilze aus dem Boden. Der grüne Fassadenanstrich wird auch benutzt, um finanzielle staatliche Unterstützung zu generieren. Das Problem des ausufernden menschlichen Antriebs an der Erderwärmung kann auch nicht gelöst werden, wenn die notwendigen politischen Entscheidungen zum Klimaschutz immer wieder durch andere Krisen wie bei der Coronapandemie im Jahr 2020 ins Hintertreffen geraten oder an fehlender politischer Nachhaltigkeit über den Wahlzyklus hinaus und divergierenden nationalen Interessen in Europa und anderen Weltregionen scheitern.

Klimaänderung hat mit einer Marktgesellschaft zu tun, die für weiteres ökonomisches Wachstum die natürlichen Ressourcen wie Wasser, Boden und Luft in vielen Regionen der Welt unkontrolliert ausbeuten und sich ihre Pfründe sichern kann. Precht (2020) betont, dass es in den Visionen der technokratischen Eliten keine unberechenbare Natur gibt, aber eine dauerhafte fortschreitende Technisierung mit schneller, höher, weiter und noch mehr Profit. Wright und Nyberg (2015) haben dokumentiert, wie technologische Fortschritte und die globalisierten Finanz-, Transport- und Kommunikationssysteme als Schmiermittel die Geschwindigkeit der menschlichen Schwungräder im Klimasystem erhöhen. Dadurch kann keine Synchronisation mehr mit den viel langsamer ablaufenden Anpassungszyklen des natürlichen Klimasystems stattfinden, sodass dieses vor dem Kollaps steht.

Überlebenskampf des Planeten

Die Inkompatibilität der über die letzten Jahrzehnte gewachsenen ökonomischen und politischen Macht- und Marktstrukturen mit den natürlich entstandenen planetaren Klimamustern und atmosphärischen und ozeanischen Zirkulationsstrukturen ist die entscheidende Ursache für den Überlebenskampf des Planeten Erde. Dieser manifestiert sich im arktischen Klimafrühwarnsystem durch abschmelzendes Meereis und die damit verbundenen regionalen und hemisphärischen Klima- und Umweltänderungen

und steht schon lange im Fokus der Öffentlichkeit. Wie Krone-Schmalz (2020) feststellt, findet dabei aufgrund der Komplexität der ablaufenden Prozesse in der Mediendebatte keine distanzierte und kritische Darstellung der Details der Klimaprobleme statt, sondern diese wird radikalisiert und teilweise skandalisiert. Den Erzählungen der von der politischen Elite gesponserten Medienaristokratie vom unbegrenztem technischen Fortschritt, notwendigem Wachstum und der Alternativlosigkeit technokratischer Lösungen zum Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen schenken weite Kreise der Öffentlichkeit keinen Glauben mehr. Die Protagonisten einer schon seit Jahrzehnten tobenden Klimadebatte predigen zudem eine Rhetorik des Verzichts und der Absenkung des Lebensstandards für die Massen. Klein (2021) beschreibt im Detail, wie durch die Privatisierung öffentlicher Ressourcen von Acker- und Weideflächen, Wasser-, Öl- und Gasvorkommen sowie die Erschließung neuartiger Profitfelder wie atmosphärischer Kohlendioxidgehalt, der bisher nicht als Ware betrachtet wurde, neue Preisschilder zur Ausplünderung des Planeten durch multinationales Kapital aufgestellt wurden.

Wie Wagenknecht (2021) erklärt, wird der Klimawandel in Europa als Alibi benutzt, um die politisch beschlossenen Klimaschutzpakete durch höhere Belastungen der ärmeren Bevölkerungsschichten zu finanzieren. Dadurch hat „der linksliberale Mainstream die Klimadebatte zu einer Lifestyle-Debatte gemacht und die Forderung nach einer CO₂-Steuer in den Mittelpunkt gestellt“. Der „European Green Deal“ muss durch die europäischen Nationalstaaten umgesetzt werden, die ihre eigenen Schwerpunkte in der Umwelt- und Klimapolitik setzen werden. Wie Wagenknecht (2021) ausführt, ist die Erzählung vom schwachen Nationalstaat in einer globalisierten Welt eine Zwecklüge zur Rechtfertigung für die Aufgabe früherer Schutz- und Sicherheitsversprechen der Staaten und der Durchsetzung einer den Interessen der Mehrheit der Bevölkerung zuwiderlaufenden neo-liberalen Wirtschaftspolitik. Vor diesem Hintergrund ist die Idee eines europäischen Klimasozialfonds zu Abfederung der hohen Kosten für Klimaschutz für die sozial schwächeren Schichten wenig hilfreich. Wagenknecht (2021) betont, dass „der Nationalstaat das einzige Instrument zur Einhegung der Märkte, zu sozialem Ausgleich ist“ und ein Mehr „an Demokratie und sozialer Sicherheit nur durch mehr nationalstaatliche Souveränität zu haben ist“.

Wie Purdy (2020) bemerkt, leben wir alle auf dem gleichen blauen Planeten, sitzen aber nicht im selben Boot. Die wohlhabenden Eliten in den vom Klimawandel deutlich weniger betroffenen Industriestaaten in mittleren Breiten gehen davon aus, dass sie selbst mit einem bis 2100 veränderten Klima klarkommen können. Deshalb werden diese nicht das Risiko eingehen, Wirtschaft und Weltordnung für weitreichende Reformen zu öffnen, die sich bei ehrlicher Auseinandersetzung mit dem Klimawandel

als notwendig erweisen würden. Der Aufruf zu einer Verzichtsrhetorik findet in den satteren Gesellschaften Westeuropas auch mehr Anklang als in den aufstrebenden Ländern Osteuropas und Asiens mit einem vergleichsweise bescheidenen Wohlstandslevel. Deshalb ist es schwer vorstellbar, eine Synthese zwischen der Verbesserung der Lebensbedingungen der globalisierten Welt und Verringerung des Treibhausgasausstoßes ohne soziale Verwerfungen herzustellen. Dies würde eine Klima- und Wirtschaftspolitik erfordern, die die divergierenden Interessen vieler Nationen und Länder berücksichtigen müsste. Dies ist selbst in der europäischen Union und in den USA ein ständiger Zankapfel wie die Diskussion um „grünen Atomstrom“ als Brückentechnologie zeigt. Man stelle sich zudem in den Vereinigten Staaten eine politisch verordnete Absenkung des Lebensstandards der größtenteils bewaffneten Mittelschicht ohne gewalttätige Auseinandersetzungen vor.

Deshalb muss man in diesem Dilemma mit schrittweisen Veränderungen beginnen. Dazu gehört es, eine glaubhafte Strategie der europäischen Union zu entwickeln, wie aus der Atmosphäre ca. 50 Gigatonnen Kohlendioxid entfernt werden sollen. Der im Herbst 2019 verkündete Masterplan des „New Green Deal“ der Europäischen Union könnte ein sinnvoller Schritt sein. Wie Harari (2019) ausführt, sind alle menschlichen Gruppen damit beschäftigt, ihre spezifischen Interessen zu verfolgen, statt die Realität zu akzeptieren und die globale Wahrheit zu verstehen. Im Falle des globalen Klimaschutzes durch Schadstoffverminderung, die eine Form des Geoengineerings darstellt, muss im politischen Dialog ein Kompromiss zwischen geopolitischem Wettbewerb und internationaler Kooperation gefunden werden. Naturbasierte Lösungen wie Aufforstung von europäischen Wäldern als Teil des „New Green Deal“ der EU, die gleichzeitig dem Erhalt von Ökosystemen dienen, sind zudem kostengünstiger und nachhaltiger und mehr als ein Pflaster auf den Wunden des Planeten.

Die Zunahme der vielfältigen Stresswarzeichen verdeutlicht, dass die Lösung des Energieproblems bei drastischer Verringerung des CO₂-Ausstoßes eine nachhaltige Kreislaufproduktion statt Wegwerfwirtschaft erfordert. Wie im Klimasystem prallen auch in der menschlichen Zivilisation globale Probleme und regionale und lokale Interessen aufeinander, die häufig in nicht auflösbare Interessenkonflikte münden und verlangen, dass die Wachstumsgesellschaft auf wirkliche Nachhaltigkeitspfade gesetzt werden müsste. Die dafür nötigen Lösungen erfordern politische Anstrengungen und Kompromisse. Die komplexer werdende Welt hat eine Wissensillusion zur Folge, sodass Protagonisten, die selbst nur wenig über das Klimasystem wissen, trotzdem radikale und realitätsferne Maßnahmen im Hinblick auf den Klimawandel vorschlagen (s. Harari 2019). Neben dem Klimaproblem warten weitere Probleme wie Begrenzung des Bevölkerungswachstum, Zugang zu Wasserressourcen, Nahrungsmittelbereitstellung, Gesund-

heitsvorsorge und Bildung auf Lösungen. Dabei werden angeblich alternativlose Lösungsvorschläge der politischen Eliten diskutiert, obwohl die verschiedenen Nationen und Menschengruppen ihre spezifischen Interessen verfolgen und die beschworene solidarische Weltgemeinschaft überhaupt nicht existiert. Die genannten Probleme spielen sich außerhalb des durch numerische Klima- oder ökonomische Entwicklungsmodelle beschreibbaren Rahmens ab und erfordern Risiko- und Perspektivmanagement durch politische Strategien und Entscheidungen. Dabei könnten die Anstrengungen zur Bewältigung der globalen Klimakrise durch militärische Konflikte mit der Gefahr einer atomaren Auseinandersetzung und einem "Nuklearen Winter" in den Hintergrund gedrängt werden.

Im Gegensatz zu früheren geologischen Epochen, in denen geologische und klimatische Prozesse das Klima veränderten, ist die Gegenwart durch den dominanten Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Umwelt bestimmt und zu einer neuen geophysikalisch gestaltenden Kraft geworden. Deshalb überrascht es nicht, dass mit dem weiteren Wachstum der Weltbevölkerung die Grenzen der lebenswichtigen globalen Ressourcen wie Trinkwasser, fruchtbare Böden, Wälder, Fischpopulationen und Versauerung der Ozeane immer deutlicher werden. Technologien zur Vermeidung eines Klimakollaps beinhalten Innovationen zu reduzierten atmosphärischen Schadstoffemissionen, zur Nahrungsmittelproduktion und zur Wasseraufbereitung, um die wachsende Weltbevölkerung besonders in den ärmsten Entwicklungsländern zu ernähren. Dabei wird der Übergang von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energiequellen einen Beitrag zur Stabilisierung des gegenwärtigen Klimazustandes leisten. Dies wird aber ohne zeitlich begrenzten Atomeneinsatz als Brückentechnologie nicht gelingen, auch wenn deren hohe Risiken sich exemplarisch in der Kernkraftkatastrophe von Tschernobyl offenbarten (s. Higginbotham 2019). Leider kann man in der Politik und den Medien eine energiepolitische Realitätsverweigerung wie beim Ausbau der Wind- oder Sonnenenergie erleben. Stark- und Schwachwindphasen sind fast immer an großskalige Wind- und Drucksysteme sowie Wolkenbildung gebunden, die in einer Marktwirtschaft zu einem großskaligen Mangel oder Überangebot führen und damit völlig unwirtschaftlich wirken.

Wie Koppetsch (2019) ausführt, tritt zudem an die Stelle demokratischer Entscheidungsfindung eine auf akademische Bildung und Wissenschaft gestützte Experten- und Beratungskultur und daraus eine angebliche Alternativlosigkeit der politischen Entscheidungen. Im globalisierten ökonomischen und ideologischen Wettbewerb, bei der Staatsverschuldung, der Coronapandemie oder dem Klimawandel stützen sich die politischen Eliten auf wissenschaftliche Expertenurteile. Dies führt zur Erosion politischer Prozesse der Willensbildung und zu einem Machtgewinn akademischer Gruppen. Die

Kartellbildung der Eliten in Staat, Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Kirche und Medien hat zur Ausbildung horizontaler und vertikaler Gradienten zwischen den oberen Rängen des Establishments und den traditionellen Mittel- und Unterschichten geführt. Diese Tendenz steht der in Krisenzeiten beschworenen Rückbesinnung auf sozialen Zusammenhalt entgegen (s. Koppetsch 2019). Eine zunehmend komplexer werdende Welt braucht eine Voranstellung von Gemeinschaftsinteressen und ein ausgleichendes, durch Bereitschaft zu Kompromissen geprägtes politisches Krisenmanagement.

Eine von Eisenstein (2019) entwickelte Idee geht davon aus, dass die größte Bedrohung für das Leben auf der Erde nicht die Emissionen fossiler Brennstoffe darstellen, sondern der Verlust von Wäldern, Feuchtgebieten und marinen Ökosystemen. Die Biosphäre erhält das menschliche Leben, und beide sind durch wechselseitige nichtlineare Beziehungen miteinander verbunden, sodass das Klimaproblem nicht durch technokratische Reduzierung der CO₂-Emissionen allein gelöst werden kann. Nach Eisensteins Interpretation sind es weder Verrücktheit noch Blindheit, die die Menschheit den Weg des kollektiven Ruins beschreiten lässt, denn der CO₂-Ausstoß steigt selbst nach drei Jahrzehnten mit internationalen Klimagipfeln immer weiter an. Die Vorstellungen von einer technisch und sozial durchtechnokratisierten Welt mit Geoengineering sind utopisch, da im nichtlinearen Klima- und Umweltsystem Eingriffe an einer Stelle zu einer Kaskade von Veränderungen mit nicht absehbaren und nicht vorhersagbaren Folgen durch Dominoeffekte führen.

Deshalb plädiert Eisenstein (2019) für einen Trend zur Regionalisierung, um wieder in enge Beziehungen zum Boden, zum Wasser, zum Leben und zur Kultur eines Ortes treten zu können und regionale geschlossene Kreisläufe zu schaffen. Die Erkenntnis über bereits überschrittene Grenzen und Tipping-Points der Globalisierung durch weltweite Vernetzung, wirtschaftliche Fernverbindungsmuster und damit einhergehende Verletzlichkeiten und Instabilitäten sollte wirkliche Nachhaltigkeitskonzepte nach sich ziehen. Die Nationalstaaten und deren Regierungen sind gefordert, ein handlungsfähiges Gemeinwesen mit stabilen sozialen Netzen zu stricken und die Folgen eines möglichen Klimakomas durch eine Art staatlicher Beatmung abzufuffern. Ökonomisches Sicherheitsdenken erfordert Deglobalisierung und Zurückhaltung im Tempo der internationalen, auch europäischen Wirtschaftsverflechtung. Die Klimakrise zeigt wie im Vergrößerungsglas das Paradoxon, dass globale Probleme am besten durch lokale und regionale Reaktionen auf der Ebene eines Dorfes, einer Stadt, von Unternehmen und staatlichen Infrastrukturen wie im Gesundheitswesen, Verkehr, Umwelt gelöst und durch die Nationalstaaten durchgesetzt werden. Ein neuer globaler grüner Klimadeal muss aufgelegt werden, und die EU kann dabei vorangehen und in enger Abstimmung mit den Nationalstaaten

glaubwürdige Perspektiven eines Übergangs zu nachhaltiger, sozialer und karbonfreier Wirtschaft entwickeln. Dabei darf nicht vergessen werden, dass wir zwar auf einer Erde, aber in verschiedenen multipolaren Welten und politischen Systemen leben, die jähren Wendungen unterliegen können und ähnlich wie das Klimasystem starke chaotische Komponenten enthalten.

Wie Chargaff (2000) schreibt, hatte der Mensch sich angewöhnt, die Natur als eine geniale Müllabfuhr zu betrachten, und das seit Tausenden von Jahren, ohne dass etwas Irreversibles geschah. Jetzt können nur international verbindliche Konventionen im grimmigen Wettbewerb um niedrigere Arbeitslöhne und abgesenkte Standards bei der Umweltüberwachung Abhilfe schaffen und eine umweltfreundlichere Alternativindustrie entwickeln. Das herrschende Klima des neoliberalen Wettbewerbs ist zudem sehr verschwenderisch, weil viel mehr konkurrierende Produkte erzeugt als konsumiert werden. Das internationale Montrealprotokoll von 1989 regelte den Schutz der stratosphärischen Ozonschicht durch das Verbot ozonabbauender Substanzen und war ein gutes Beispiel für internationale Umweltregelungen. Leider sind das Kyotoprotokoll und das Pariser Nachfolgeabkommen von 2015 zur versuchten Deckelung der weltweiten Kohlendioxidemissionen als eine Fallstudie für gescheiterte Umwelt- und Klimapolitik zu betrachten, die das große Misstrauen und die Illusionen zwischen den Kontinenten und Staaten verdeutlichen. In Anbetracht weltweiter Rüstungsausgaben von ca. 2 Billionen \$ im Jahr 2020 sollte man erwarten können, durch Budgetumschichtungen der G20-Staaten die Aufwendungen für den Klima- und Umweltschutz drastisch zu erhöhen. Reduzierte Rüstungsausgaben würden massiv zur Schonung der materiellen natürlichen Ressourcen beitragen und könnten sehr stark zur Wunschvision eines nachhaltigen Planeten beitragen.

Die Vision eines weltweiten Konsens beim Umbau der Weltwirtschaft zu einer karbonfreien und nachhaltigen Produktionsweise ist ein bisher nicht realisiertes Zukunftsversprechen, denn die historisch für den größten Teil des CO₂-Ausstoßes verantwortlichen Industrienationen beweisen wenig Bereitschaft, die in internationalen Verträgen festgehaltenen Klimaverpflichtungen einzuhalten und saubere Energietechnologien zu entwickeln. Zunehmende Treibhausgasemissionen werden deshalb auch in den nächsten Jahrzehnten die globalen Durchschnittstemperaturen erhöhen. Infolge der längeren thermischen Reaktionszeit der Ozeane auf dekadischen Zeitskalen und der damit verbundenen Zeitverzögerungen wird sich der gegenwärtig beobachtete Erwärmungstrend selbst bei reduzierten atmosphärischen Treibhausgasemissionen noch über weitere Jahrzehnte fortsetzen. Man kann erwarten, dass sich die anthropogen verursachte Klimaerwärmung ab Mitte des 21. Jahrhunderts aus der Bandbreite der natürlichen Klimavariabilität abheben wird (s. Osman et al. 2021).

Die wissenschaftliche Komponente

Wissenschaftliche Erkenntnisse in einem derartig komplexen und nicht-linearen System wie dem Klimasystem bleiben immer relativ, bedürfen der Interpretation und Einschränkung, sind selten eindeutig und leben vom Wettkampf miteinander konkurrierender und sich häufig widersprechender Theorien. Besondere Bedeutung besitzt dabei die Erhebung von Daten des gekoppelten Klimasystems in einem globalen Messnetz, das über den Ozeanen weiterhin lückenhaft und durch Satellitendaten erst seit 1979 abgedeckt wird. Zur Stabilisierung des Weltklimas benötigen die Industrienationen einen Plan für die nächsten zwanzig bis dreißig Jahre, weil es danach wegen der irreversiblen nichtlinearen Kippunkte im Klimasystem zu spät sein könnte.

Bereits in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden die Grenzen des Wachstums und die möglichen Entwicklungswege unter Berücksichtigung von Ressourcenverbrauch und Emissionen und Abfällen eines überbevölkerten Planeten diskutiert. Meadows et al. (1972) analysierten Grenzüberschreitungen durch unkontrolliertes wirtschaftliches Wachstum und zu schnelle Veränderungen, die die Leitplanken des planetaren Klimasystems in katastrophaler Weise überschreiten. Auf der Basis nichtlinearer Computermodelle wurden ökonomische Entwicklungswege aufgezeigt, um den ökologischen Fußabdruck so zu reduzieren, dass dieser die des Planeten Erde nicht überschreitet (s. Meadows et al. 2016). Die Warnungen vor der Vernichtung der menschlichen Lebensgrundlagen auf der Erde erfolgten damit lange vor dem ersten Bericht des IPCC 1990.

Diese heute Tipping-Points genannten Grenzwerte können in diesen Computermodellen durch Verlangsamung von Rückkopplungsschleifen und Korrekturen zukunftsichernd und nachhaltig sein oder in den ökologischen Kollaps führen. Dabei werden Mechanismen der Nahrungsproduktion, der Landnutzung, des Zustandes der Böden und Wälder, Wassernutzung, biologische Artenvielfalt und Ökosysteme berücksichtigt. Diese Modelle sind komplex, basieren auf nichtlinearen gekoppelten Gleichungen, beschreiben positive und negative Rückkopplungsschleifen und liefern mögliche Zukunftsszenarien. Dennoch stellen sie nur sehr vereinfachte Abbildungen der realen Welt dar und müssen mit der nötigen Skepsis betrachtet werden. Als Blaupause einer Grenzüberschreitung und der internationalen Reaktion durch das Montrealabkommen zum Verbot ozonschädigender Substanzen in der Atmosphäre kann das antarktische Ozonloch betrachtet werden. Meadows et al. (2016) entwickelten Szenarien zur Stabilisierung der Weltbevölkerung bis 2040, die einen angemessenen Lebensstandard garantieren und auf Wachstumsbeschränkungen und verbesserten Techniken unter

Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskonzepten beruhen könnten. Die Spaltung der politischen Eliten selbst in der Europäischen Union sowie divergierende politische und ökonomische Interessen der USA und Rußlands sowie Chinas verhindern bisher jedoch die Lösung der globalen Klima- und Umweltprobleme und den notwendigen Umbau der globalen Weltwirtschaft zu einem nachhaltigen karbonfreien Wirtschaftssystem. Dabei könnten internationale Interessenkonflikte und daraus resultierende chaotische Fehlentwicklungen die globale Klimapolitik um Jahrzehnte zurückwerfen.

Die fundamentale Bedeutung der Physik und der Naturwissenschaften für das Verständnis des gekoppelten Klimasystems der Erde wird bei allen Diskussionen häufig aus den Augen verloren. Wissenschaft kann niemals endgültig etwas beweisen, sondern entwickelt Theorien, die bis zum Beweis des Gegenteils gelten und einem Zeitgeist folgen. Da der anthropogene Treibhauseffekt zur Erklärung der gegenwärtigen Klimaerwärmung nur ein geringes physikalisches Grundverständnis erfordert, melden sich auch viele Laien zu Wort. In einem derart komplexen System wie dem Klimasystem der Erde streiten sich aber auch ausgewiesene Experten mit langer Erfahrung im Fachgebiet über seine fundamentalen Aspekte und die Rolle von anthropogenen Faktoren und internen Prozessen durch nichtlineare Dynamik bei Klimaveränderungen.

Die extrem vereinfachte Darstellung der komplexen und heterogenen Klimaproblematik in den Medien und Talkrunden mit Laien und Klimaaktivisten führt zu einem „Orwellschen Neusprech“ ohne ausreichende wissenschaftliche Substanz. Da wir erst seit 1979 gesicherte globale Klimadaten unter Einschluss von Satellitendaten besitzen und keine ausreichend lange Datenreihen vorliegen, sind wir zum großen Teil auf Modelle angewiesen. Tausende von Physikern und Meteorologen diskutieren die Konsequenzen von Modellstudien, ohne sie an langen realen Datensätzen über Jahrhunderte und den Einfluss einer veränderlichen Ozeanzirkulation und anderer Faktoren realitätsnah testen zu können. Wahrscheinlich ist dies der Grund dafür, dass das politische Führungspersonal Modellszenarien der zukünftigen Klimaentwicklung weiterhin skeptisch gegenüber steht und im fünfjährigen Wahlrhythmus nur wenig Expertise und Nachhaltigkeit bei der Verwirklichung langfristiger Klimaanpassungsstrategien entwickeln kann.

Hierarchie von Klimamodellen

Komplexe Systeme wie das Klimasystem der Erde arbeiten nicht wie ein präzises Uhrwerk, sondern hängen empfindlich von den Anfangs- und Randbedingungen ab und folgen einer komplexen Dynamik mit nichtlinearen und damit nicht vorhersagbaren Prozessen. In komplexen Systemen treten unablässig Instabilitäten auf, die durch Kippunkte das System in stabile Bedingungen mit Berechenbarkeit oder chaotische Entwicklungs-

pfade mit Unberechenbarkeit führen können. Unsere physikalisch basierten Vorstellungen zur Wirkungsweise des Klimasystems und zum Treibhauseffekt basieren auf sehr vereinfachenden Annahmen. Die Vorstellung vom Klimasystem als einem Uhrwerk, in dem alles genau berechnet und kontrolliert werden kann, hat mit der Realität nichts gemein.

Die Wirklichkeit ist viel komplexer und durch nichtlineare Prozesse bestimmt, deren Ursachenanalyse infolge fehlender Kausalketten erschwert ist. Dadurch entstehen zunehmende Unsicherheitskaskaden, nicht nur in der Beurteilung der Modellergebnisse im Vergleich mit Beobachtungsdaten, sondern auch bei der Umsetzung von Klimaszenarien in politische Handlungsempfehlungen. Dieser Umstand erfordert die ständige Vermessung möglichst vieler Parameter des Klimasystems und setzt allen Modellen enge Grenzen. In einer Welt gewaltiger Veränderungen und radikaler Unsicherheiten benötigt man gesichertes wissenschaftliches Wissen, das in Systemen wie dem Klimasystem auf einer Komplexitätsreduktion basiert. Dabei wird das zu untersuchende System soweit reduziert, dass auf der entsprechenden Komplexitätsebene versucht wird, zwischen wichtigen und unwichtigen Informationen zu unterscheiden, obwohl dies in chaotischen Systemen besonders schwierig ist. Im Klimasystem wie in jedem komplexen System wird diese Methode in breiter Form angewendet und basiert auf einer Hierarchie von Klimamodellen, die von sehr einfachen „Spielzeugmodellen“ zu den sehr komplexen Zirkulationsmodellen und gekoppelten Erdsystemmodellen reicht. Diese Herangehensweise erlaubt es, eine physikalisch basierte Vorstellung der Wirkungsweise des Klimasystems zu entwickeln, damit über die Zukunft des Planeten Erde nicht nach dem Zufallskonzept entschieden werden muss.

Die aus den Wettervorhersagemodellen hervorgegangenen Klimamodelle wurden durch die Arbeiten von Smagorinsky (1963) entwickelt. Dazu mussten die in den Wettervorhersagemodellen verwendeten Parametrisierungen und Vereinfachungen für Prozesse unterhalb der Gitterauflösung der Modelle und numerischen Schemen zur Zeitintegration der Modellgleichungen verändert und verbessert werden. Das betraf insbesondere die Sicherung der Masse- und Energieerhaltung bei Modellintegrationen über deutlich längere Zeiträume von Jahreszeiten bis zu Dekaden und Jahrhunderten. Dieser Umstand hat zu einer Trennung der Wettervorhersage- und Klimamodellcommunitys geführt, die man durch die Idee der nahtlosen Vorhersagen (Seamless Predictions, Hoskins, 2013) wieder gern zusammenführen würde. Es ist eine der großen Herausforderungen der Klimaforschung, die herausragende Expertise im Bereich der numerischen Wettervorhersagemodelle auf die Weiterentwicklung der komplexen Klimamodelle und die Benutzung von Datenassimilations-

techniken in der Atmosphäre, dem Ozean, im Meereis und in biogeochemischen Kreisläufen anzuwenden. In Anbetracht der enormen Komplexität des Klimasystems sind selbst die am weitesten entwickelten Modelle nur sehr beschränkte und reduzierte Abbilder der Wirklichkeit und mit vielen Fehlern und prinzipiellen Unzulänglichkeiten behaftet, aber trotzdem das einzige zur Verfügung stehende Instrument zur Abschätzung der Klimafolgen menschlichen Handelns. Die Klimamodelle müssen immer wieder mit Beobachtungsdaten konfrontiert und validiert werden, und bis heute ist die Datenlage über den Ozeanen oder in der Arktis unzureichend.

Klimaszenarien beruhen auf den leistungsfähigsten Computermodellen des gekoppelten Klimasystems, die durch die gemeinsame Arbeit der Experten in den großen Klimaforschungszentren über die vergangenen Jahrzehnte entwickelt wurden. Sie stellen das einzige wissenschaftliche Instrument zur Abschätzung der menschlich gemachten Folgen des Klimawandels dar. Inzwischen leisten sich viele Industrienationen der G20-Staaten, wie z. B. Brasilien oder China, eigene Klimaforschungszentren und benutzen komplexe Modelle. Diese intellektuellen Instrumente stellen eine große Errungenschaft dar und wurden 2021 durch die Verleihung des Nobelpreises für Physik an Klaus Hasselmann und Syukuro Manabe gewürdigt. Selbstverständlich müssen diese unvollständigen Modellabbilder der Realität ständig weiterentwickelt und verbessert und ihre Aussagen und Konsequenzen im Licht besserer Daten immer wieder neu beleuchtet und interpretiert werden.

Dies betrifft insbesondere die Erhöhung der räumlichen Auflösung, die Verbesserung der Parametrisierungen, die Rolle intern generierter Klimavariationen und die Notwendigkeit von Ensemblesimulationen zur Abschätzung intern generierter Klimavariabilität. Diese wurden lange Zeit im wissenschaftlichen Zeitgeist vor dem Hintergrund steigender Treibhausgasemissionen ignoriert und fanden wenig Beachtung, erleben jetzt aber eine eindrucksvolle Renaissance. Man muss zudem berücksichtigen, dass das Klimasystem der Erde durch Prozesse in der Geosphäre und im Erdkern genauso mitbestimmt wird wie durch Prozesse in der Thermosphäre und der Magnetosphäre, dem planetaren Schutzschild vor Sonnenstürmen. Mögliche Helligkeitsschwankungen der Sonne und Änderungen der Vulkanaktivität haben historisch eine bedeutende Rolle bei natürlichen Klimaveränderungen gespielt und sind von großer Bedeutung bei der Bewertung von Unsicherheiten zukünftiger Klimaprojektionen.

Palmer und Stevens (2019) haben in einer selbstkritischen Reflexion ihre Unzufriedenheit mit den gegenwärtigen Erdsystemmodellen zum Ausdruck gebracht, auf denen die Klimaprojektionen für die nächsten Jahr-

zehnte basieren. Diese erlauben es bisher nicht, die Weltgesellschaft mit den erforderlichen und ausreichend genauen Informationen über das Tempo der anthropogen bestimmten Erwärmung, über die Bewertung großräumiger Veränderungen, deren regionale Auswirkungen oder die Wahrscheinlichkeit von nichtlinearen Überraschungen zu versorgen. Leider ist es in einer Zeit aufgeheizter politischer Diskussionen schwer, auf die offensichtlichen Unzulänglichkeiten in der gegenwärtigen Klimamodellierung hinzuweisen und kritische Bemerkungen anzubringen. Die Klima- und Erdsystemmodelle als die Quellen der Klimaprojektionen, auf denen schwerwiegende politische Weichenstellungen basieren, müssen kritischer hinterfragt werden, um sie in einer internationalen Anstrengung im nächsten Jahrzehnt unter Einsatz erheblicher finanzieller Mittel deutlich zu verbessern und glaubwürdiger zu machen.

Dieses Buch über das unberechenbare Klima und die Rolle von Nichtlinearitäten, Variabilitäten und Unsicherheiten wurde für Physiker, Naturwissenschaftler und interessierte Bildungsbürger geschrieben, die sich ein Bild von den im Klimasystem wirkenden Prozessen und den prinzipiell beschränkten Möglichkeiten ihrer Berechnung und Modellierung machen wollen. Der Terminus unberechenbar bezieht sich auf die Zukunft, denn die Daten des 20. Jahrhunderts mit den Reanalysedaten ERA-20C sind das Ergebnis von Hindcast-Simulationen, also dem Blick zurück. Diese und Klimaproxies über Jahrtausende vermitteln uns eine Vorstellung von der großen Bandbreite historischer Klimaänderungen und extremen Änderungen wie von Gerste (2015) beschrieben.

Der Terminus unberechenbar weist zudem auf die bisherige Unmöglichkeit von Jahreszeitenprognosen und Klimavorhersagen über Jahrzehnte und mehr hin. Die Grenze von nordhemisphärischen Wettervorhersagen liegt derzeit bei vier bis sieben Tagen und die prinzipielle Grenze für weiterreichende Wettervorhersagen wird bei maximal zwei Wochen angenommen. Mögliche Jahreszeitenvorhersagen würden auf der Ausnutzung von längeren Zeitskalen in der Stratosphäre, den Ozeanen und im Meereis, in der Schneebedeckung und der Bodenfeuchte beruhen müssen, die sich aus dem internen Rauschsignal herausheben könnten. Interne Klimavariabilität stellt eine Tarnkappe dar, die anthropogene Signale maskieren, verstärken oder abmildern kann und ist deshalb der wesentliche Schlüssel für ein besseres Verständnis der Ursachen des Klimawandels.

Die Existenz deterministischen Chaos in nichtlinearen Systemen hat zur Einführung des Begriffs der Klimaprojektionen eingeführt, der den möglichen Phasenraum und damit die Unschärfe von Klimamodellsimulationen in einem Modellensemble abdeckt. Der Strahlungsantrieb durch

zunehmende Treibhausgase kann in Klimamodellszenarien für unterschiedliche ökonomische Entwicklungspfade berechnet werden, jedoch sind seine globalen und regionalen dynamischen Auswirkungen durch atmosphärische und ozeanische Zirkulationsänderungen im nichtlinearen Klimasystem der Erde weiter unsicher. Diese Auswirkungen werden zudem durch weitere nichtlineare Rückkopplungen mit biogeochemischen Zyklen von Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff im Ozean und ihrer Wechselwirkung mit Ökosystemen reguliert, und sie generieren Kaskaden von zunehmenden Unsicherheiten, die unser Nichtwissen mitbestimmen.

Wir wissen fast alles über den globalen Temperaturanstieg durch CO_2 -Zunahme, aber unsere Vorhersageinstrumente dafür, welche regionalen Zirkulationsänderungen und Änderungen in Wetterextremen in diesem nichtlinearen, chaotischen System unter dem Einfluss veränderter menschlicher Einflüsse zukünftig stattfinden werden, sind unscharf. Da die Entwicklung des Klimasystems mindestens zur Hälfte durch anthropogene Prozesse, aber zur anderen Hälfte durch natürliche und intern generierte Änderungen der Dynamik bestimmt wird, müssen die existierenden Daten zur Quantifizierung von Änderungen im Klimasystem immer wieder neu beleuchtet werden. Physik kann nur in eng begrenzten und vereinfachten Systemen fundamentale Wahrheiten beweisen. In nichtlinearen und extrem komplexen Systemen sind die Grautöne und Unsicherheiten sehr stark und Beweise müssen dann wie in der Religion teilweise durch Glauben ersetzt werden. Ebeling und Feistel (2017) haben darauf hingewiesen, dass Konzepte und Methoden der Selbstorganisation (Synergetik) eine wichtige Rolle beim Verständnis komplexer Systeme, der Analyse ihrer Dynamik und zukünftiger Änderungen spielen und auch zur Modellierung zukünftiger Klimaszenarien beitragen könnten. Sie betonen die sinnlose Vergeudung von riesigen Energie- und Rohstoffmengen für Kriege auf diesem Planeten, die neben anderen Schäden erhebliche Mengen von CO_2 -Emissionen verursachen und bei internationalen Klimaverhandlungen ausgeklammert werden. In Anbetracht der weitgehend unsicheren Folgen von Klimaschutzmaßnahmen als Folge von unklaren klimadynamischen Ursachen kann man sich bei Abrüstungsmaßnahmen des Erfolgs wirklich sicher sein.

Einhegung des globalen Klimawandels durch CO_2 -Reduktion ist das zurzeit sinnvollste, aber dennoch kein Allheilmittel zur Rettung des Planeten, sondern erfordert ergänzend Investitionen in Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel auf lokaler und regionaler Ebene. Dieser Präventionsaspekt in Bezug auf Katastrophenschutz muss sich auch in der politischen Agenda niederschlagen und erfordert eine bessere Zusammenarbeit der politischen Entscheidungsträger mit den Experten in den Wettervorhersagezentren.

Nahtlose Vorhersagen

Die Zivilgesellschaft ist für das Funktionieren wichtiger Bereiche, wie der Energie-, Wasser- und Landwirtschaft, des Flug- und Schiffsverkehrs und weiterer auf verlässliche Wettervorhersagen angewiesen. Die prinzipiellen Grundlagen für Jahreszeitevohersagen existieren zwar (s. Saha et al. 2014), weisen aber völlig unzureichende Trefferquoten auf und stehen auf wissenschaftlich unsicheren Pfeilern. Die Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert sind gleichfalls mit Unsicherheiten behaftet, die in der öffentlichen Debatte ignoriert werden. Grund für die Schwierigkeiten bei der Vorhersage auf Wetter- und Klimazeitskalen sind nichtlineare Prozesse im Klimasystem der Erde, die durch Makroturbulenz, intern generierte Variabilität und deterministisches Chaos bestimmt werden.

Deshalb beschäftigt sich dieses Buches mit der Unberechenbarkeit des Klimasystems, damit der interessierte Bildungsbürger seine Wirkungsweise, die Grenzen von Vorhersagen und die Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung des Planeten Erde verstehen lernt. In der Medienwelt werden wir mit gefilterten und interessengetriebenen Informationen in Bezug auf den Klimawandel überschwemmt. Ein Blick hinter die Fassade ist nötig, um Klarheit und Durchblick über die fundamentalen Prozesse im Klimasystem zu erhalten und Handlungsspielräume zu erkennen. Die Dynamik dieses Planeten befindet sich anders als kolportiert, nur teilweise in unserer Hand. Neben dem menschlichen Einfluss durch Treibhausgase und Aerosole generiert das Klimasystem seine eigene natürliche und interne Variabilität mit Klima-anomalien und Extremwetterlagen, die durch die gegenwärtigen Klimamodelle wahrscheinlich unterschätzt wird.

Während die europäischen Wettervorhersagemodelle dank Datenassimilations- und Ensembletechniken auch glaubwürdige Niederschlagsvorhersagen erlauben und damit Hochwasserschutz durch Vorhersage der Pegelflussstände gewährleisten können, sind Klimamodelle bisher nur qualitative Tools. Bedeutende intellektuelle und finanzielle Anstrengungen werden erforderlich sein, ihre Qualität soweit zu verbessern, dass Klimaszenarien als Grundlage für regionale Klimaschutzmaßnahmen dienen können. Klimamodelle projizieren zwar eine eindeutige Zunahme der Temperaturen, jedoch keine eindeutigen Trends bei der Entwicklung der Niederschläge. Wie Marx et al. (2018) zeigen konnten, ist in den 1,5°C-Klimaszenarien eine Zunahme der Überflutungsgefahren in den mitteleuropäischen Bergregionen zu erwarten.

In diesem Buch wird der Wissensstand zu Klimaänderungen in einem komplexen chaotischen und nichtlinearen System reflektiert. Annus mirabilis, das Jahr der Wunder 1989 mit dem Mauerfall zwischen Ost und West,

wie auch die Coronapandemie im Jahr 2020 waren Lehrstunden hinsichtlich der Unvorhersagbarkeit historischer und ökonomischer Entwicklungen. Sie bilden eine Blaupause für den Zusammenbruch scheinbar gefestigter Vorstellungen und Sicherheiten und der Unsicherheit von Projektionen und Szenarien. Es gibt keinen Grund zur Annahme, dass derartige Unsicherheiten nicht auch im Klimasystem wirken. Gesellschaften als Ganzes sind zu träge, um sich grundlegend und schnell zu ändern. Insofern ähneln sie mit ihren langen Zeitkonstanten dem Klimasystem und erfordern deutliche Impulse für grundlegende Änderungen. Die in der Coronapandemie praktizierte Expertokratie mit dem Schulterchluss von Politik und Wissenschaft und einer Instrumentalisierung von Teilen der Wissenschaft darf keine Schablone für die Klimapolitik werden. Distanz der Klimaforschungsexperten zu den Medien und Unabhängigkeit von den politischen Entscheidungsträgern sollten Voraussetzungen für eigenständige und unvoreingenommene Beratung sein, ohne den Hauch von Alternativlosigkeit aufkommen zu lassen. Nicht nur Prozesse im Klimasystem laufen mit einer gehörigen Portion Chaos ab, sondern auch politische Prozesse, die den Klimawandel eingrenzen und eine nachhaltige Entwicklung der Zivilgesellschaften gewährleisten sollen, sind selten nachhaltig, sondern häufig chaotisch.

Während der Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 im Südwesten Deutschlands konnte man erleben, dass Klimaaktivisten aus der Politik, den Medien und Teilen der Wissenschaft diese zur Bestätigung ihrer klimapolitischen Ansichten zum globalen Klimaschutz instrumentalisierten. Dabei wird die Verbindung von lokalen und regionalen Wetterextremen zum globalen Klimawandel durch die Daten des deutschen Wetterdienstes nicht bestätigt. Diese zeigen seit 1881 bis heute keine Zunahme der Niederschläge im Sommer, jedoch eine Zunahme im Winter (s. DWD 2020). Der Klimareport des DWD betont bei Trockenperioden wie auch Starkregen die Rolle natürlicher Fluktuationen. „Hinzu kommen ausgeprägte natürliche Schwankungen mit abwechselnden Phasen stärkerer und geringerer Trockenheit, wie sie in ähnlicher Form auch bei den Starkniederschlagsereignissen zu finden sind.“ Die geplante Dekarbonisierung der Wirtschaft wird Jahrzehnte des Umbaus erfordern, aber Extremwetterlagen in Verbindung mit kleinräumigen Wetterphänomenen wie Gewittern, Starkregen und Hagel nicht verhindern. Hier sind konkrete infrastrukturelle Anpassungsmaßnahmen in den Regionen erforderlich.

Man muss sich darüber im klaren sein, dass Wissenschaft nicht unabhängig von der Politik stattfinden kann und Daten und Modelle alles zugeben, wenn man sie nur lange genug quält. Die Bewahrung der Lebensgrundlagen auf diesem einzigartigen Planeten erfordert deshalb größere gesellschaftliche Aufwendungen für umfassende Risikovorsorgeforschung im

Gesamtsystem der solarerrestrischen Physik von der Geo-, Hydro-, Kryo-, Atmo- und Biosphäre bis zur Magnetosphäre und der Sonnenatmosphäre. Besondere Bedeutung besitzt jedoch die Entwicklung von Vorhersagetools auf Jahreszeiten bis zu Jahrzehnten des gekoppelten Atmosphäre-Ozean-Meereis-Systems mit Datenassimilations- und Ensembletechniken.

Dabei sollte die Klimamodellcommunity auf die herausragende Expertise der Wettervorhersagedienste zurückgreifen und die bisher nur unzureichende Kooperation unter dem Gesichtspunkt von „Seamless Weather and Climate Predictions“ deutlich ausbauen. Grundlagen dafür wurden in den YOPP- und MOSAiC-Projekten „Year of Polar Prediction“ (s. WCRP 2013) und „Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate“ (MOSAiC 2016) gelegt.

Literatur

- Chargaff, E., 2000, *Ernste Fragen*, Klett-Cotta, Stuttgart, 287 S.
- DWD, 2020, *Nationaler Klimareport*. 4. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Potsdam, Deutschland, 54 S.
- Ebeling, W., und R. Feistel, 2017, *Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft und Strategien zur Gestaltung der Zukunft*, Leibniz Online, 27, 1–20.
- Eisenstein, C., 2019, *Klima, Eine neue Perspektive*, Europaverlag, 396 S.
- Gerste, R., 2015, *Wie das Wetter Geschichte macht*, Klett-Cotta, Stuttgart, 288 S.
- Harari, Y. N., 2019, *21 Lektionen für das 21. Jahrhundert*, Beck Verlag, 459 S.
- Hasselmann, K., 1993, *Optimal fingerprints for the detection of time-dependent climate change*, *J. Climate*, 6, 1957–1971.
- Headrick, D. R., 2021, *Macht euch die Erde untertan. Die Umweltgeschichte des Anthropozäns*, wbg Theiss, 639 S.
- Hegerl, G. et al., 1996, *Detecting greenhouse-gas-induced climate change with an optimal fingerprint method*, *J. Climate*, 9, 2281–2306.
- Higginbotham, A., 2019, *Mitternacht in Tschernobyl, Die geheime Geschichte der größten Atomkatastrophe aller Zeiten*, Fischer, 614 S.
- Hoegh-Guldberg, O., et al., 2018, *Impacts of 1.5 °C global warming on natural and human systems*, in *Global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C*, in press.
- Hoskins, B., 2013, *The potential for skill across the range of the seamless weather-climate prediction problem—a stimulus for our science*, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 139, 573–584.
- Huxley, A., 1960, *Wiedersehen mit der schönen neuen Welt*, Piper, 128 S.
- Kaku, M., 2019, *Abschied von der Erde*, Rohwohlt, 477 S.