

Mit Vollgas in die Apokalypse

Reflexionen zum Klimawandel aus physikalischer Sicht

Michael Düren

Es sei die Frage aufgeworfen, ob den düsteren Prognosen der Naturwissenschaften zum Klimawandel Glauben geschenkt werden muss. In der Tat konstituieren die modernen evidenzbasierten Naturwissenschaften ein kollektives, menschengemachtes Modell der Wirklichkeit, das sich als ausgesprochen zuverlässig und mächtig erwiesen hat. Die Kombination aus Wissenschaft und Technik erlaubt präzise Aussagen über den Mikro- wie den Makrokosmos zu treffen und sowohl in die Vergangenheit zu blicken als auch verlässliche Prognosen für die kurz- und langfristige Zukunft zu treffen. Über unseren Planeten Erde wissen wir sicher, dass er vor etwa 5 Milliarden Jahren entstanden ist, und in etwa 5 Milliarden Jahren zerstört wird, weil dann unsere Sonne explodieren wird. Selbst wenn wir alle Kräfte bündeln und sogar die Formulierung der Naturgesetze ändern würden, könnten wir die zukünftige Vernichtung der Erde nicht verhindern, da die Natur nicht mit uns verhandelt. Sie folgt ihren Gesetzmäßigkeiten.

Schau ich mir als Physiker unsere heutige gesellschaftliche Entwicklung an, so verlasse ich zwar mein gewohntes Terrain, kann aber dennoch viele der stattfindenden Vorgänge mit der Methodik eines Physikers beschreiben, einordnen, von nicht-empirischen Glaubenssätzen befreien und entsprechend relativieren. Diese Vorgehensweise hat sich als entscheidend herausgestellt, um die Diskrepanz zwischen dem beeindruckenden Fortschritt in den Naturwissenschaften und der Technik einerseits und dem offensichtlichen Versagen der Menschheit bei der Erhaltung ihrer zukünftigen Lebensräume andererseits zu begreifen. Emotionale, religiöse und ideologische Denkmuster dominieren in hohem Maße die Urteilsfähigkeit der Menschen und verhindern eine angemessene Einschätzung der Dringlichkeit der Lage sowie die Entwicklung effektiver Gegenmaßnahmen durch die Entscheidungsträger der menschlichen Gemeinschaften. Um diese Problematik zu verstehen, ist es notwendig, Erkenntnisse aus den Kognitionswissenschaften heranzuziehen.

Grenzen von Vernunft und Freiheit

Der moderne Mensch, wie wir ihn heute kennen, ist seit etwa 200.000 Jahren auf diesem Planeten anzutreffen und zeichnet sich durch eine als intelligent zu bezeichnende Denk- und Handlungsfähigkeit aus, die sich graduell, jedoch nicht grundsätzlich von den Denk- und Handlungsfähigkeiten anderer Lebewesen unterscheidet. Mythen und detailreiche Religionen sind aus den letzten wenigen Jahrtausenden der Menschheit bekannt, in denen sich auch die Schriftsprache und die Naturwissenschaften ausgebildet haben. Seit 2500 Jahren und in noch umfassenderer Weise seit 250 Jahren kämpfen Aufklärer für die Überwindung des absoluten Geltungsanspruchs von Mythen, Religionen und ad-hoc definierten Glaubenssätze. Gegenwärtig ist jedoch eine Renaissance manipulativer Fehlinformationen zu beobachten, die oft als »Fake News« bezeichnet werden, sich durch die sozialen Medien großräumig verbreiten und sich ebenso tiefgreifend ins Denken der Menschen einbringen wie in der Vergangenheit.

In seinem Modell des menschlichen Denkens beschreibt der Psychologe und Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften, Daniel Kahneman, die Funktionsweise menschlichen Entscheidens sehr passend.¹ Er postuliert, dass das menschliche Denken aus zwei konkurrierenden Systemen besteht: Das erste System, das als »schnelles Denken« bezeichnet wird, agiert spontan und intuitiv, wobei die Urteilsfindung in Bezug auf die Welt als »aus dem Bauch heraus« beschrieben wird. Demgegenüber steht das »langsame Denken«, das eine analytische Beurteilung komplexer Situationen ermöglicht und auf dieser Grundlage fundierte logische Entscheidungen ermöglicht. Aus der Perspektive der Informatik beruht das »schnelle Denken« auf »maschinellem« Lernen, das durch die Technologie von »ChatGPT« einer breiten Öffentlichkeit bekannt wurde. Demgegenüber erlaubt das »langsame Denken« des Menschen die Entwicklung logisch korrekter Schlussfolgerungen mit nachvollziehbarem Wahrheitsgehalt, ähnlich wie bei dem klassischen Computer, der exakte Lösungen produziert, die genauso wahr sind wie die einprogrammierten Algorithmen und ihr Input. Im Rahmen dieses Modells lässt sich die Erkenntnis »Der Mensch denkt, Gott lenkt« wie folgt interpretieren: Das menschliche Bewusstsein versucht, logische Schlussfolgerungen zu ziehen, doch die Entscheidungen werden maßgeblich durch das neuronale Netzwerk im Gehirn des Menschen getroffen. Die moderne Hirnforschung kommt durch konkrete Experimente zu einem ähnlichen Ergebnis: Das menschliche Bewusstsein – was immer dieses Konzept auch sein mag – stellt nur eine Instanz mit begrenzter Wirkung auf die Entscheidungen der unbewussten Teile des Gehirns dar.

Gemäß den empirischen Erkenntnissen von Kahneman folgt der Mensch bei wichtigen Entscheidungen häufig dem »Bauchgefühl«, anstatt sich auf die Analyse

¹ Kahneman 2012.

und Bewertung von Informationen zu stützen. Das schnelle Denken ist geprägt von früheren Erfahrungen und tradierten Denkmustern und kann durch »gebetsmühlenartige«, wiederholte Einflussnahme modifiziert und gefestigt werden, unabhängig vom Wahrheitsgehalt dieser Einflüsse. Diese Erkenntnis lässt sich auf moderne Umfelder übertragen, in denen irrationale Entscheidungen, bspw. bei der Wahl von politischen Parteien oder bei der Beurteilung der globalen Klimakatastrophe, mehrheitsfähig werden, da die Boulevardpresse und darauf folgend soziale Medien diese Fake News iterieren.

Der apokalyptische Klimawandel

Seit rund 300 Jahren hat sich eine invasive Spezies auf unserem Planeten etabliert, die durch die Fortschritte von Naturwissenschaft und Technik in der Lage ist, genügend Energie und Nahrung zu produzieren, um ihre Population auf inzwischen 8 Milliarden Individuen zu vervielfachen. Derzeit emittiert jeder Mensch im Durchschnitt jährlich fünf Tonnen fossile Abgase in die Atmosphäre, wobei die Verteilung des Ausstoßes je nach individueller Wirtschaftskraft sehr unterschiedlich ist.

Die Tatsache, dass die 37 Milliarden Tonnen CO₂, die pro Jahr in die Atmosphäre emittiert werden², zur Erderwärmung führen, ist physikalisch trivial. Es ist daher nicht überraschend, dass bereits in den 1970er Jahren interne Studien von Ölkonzernen den Klimawandel präzise vorhersagten.³ Bemerkenswert ist die Tatsache, dass es bis in die heutige Zeit Leugnerinnen und Leugner des anthropogenen Klimawandels gibt. Diese werden vor allem durch die Lobbyisten der Öl- und Autoindustrie sowie durch rechte Gruppierungen angestachelt und finanziert. Letztere machen sich die Unsicherheiten der Menschen bei der Umstrukturierung der fossilen Industrie zunutze.

Innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft besteht Konsens darüber, dass der Mensch den Planeten Erde signifikant auf globaler Skala verändert hat. Gemäßigte Klimabedingungen sowie die Lebensbedingungen der Tiere und Pflanzen werden sich gegenüber den letzten 11.000 Jahren des Holozäns signifikant verändern, wodurch eine neue Ära eingeläutet wird: das vom Menschen geschaffene Anthropozän. Diese Entwicklung wurde bereits in den vergangenen Jahrzehnten durch Veränderungen der Landnutzung sowie Umweltverschmutzung eingeleitet und führt aktuell bereits zu einem massiven Artensterben sowie ersten deutlichen Anzeichen eines globalen Klimawandels.

2 Ritchie/Roser 2020.

3 Supran/Oreskes/Rahmstorf 2023.

Die vorliegenden Untersuchungen von Ripple u.a. 2020⁴, 2023⁵ und 2024⁶ beleuchten die Konsequenzen des Klimawandels, sowohl in der Gegenwart als auch in der Zukunft. Die Intensität und die Frequenz von extremen Wetterereignissen wie Wirbelstürmen, Überschwemmungen, Erdrutschen, Waldbränden, Hagel, Dürren und Hitzewellen werden zukünftig zunehmen. Diese Ereignisse werden potenziell signifikante infrastrukturelle Schäden verursachen und Menschenleben fordern. Gletscher in Bergregionen, in Grönland und in der Antarktis schmelzen gegenwärtig mit hoher Geschwindigkeit, was in Zukunft zu einem Anstieg des Meeresspiegels und zur Überschwemmung von Küstenregionen und Regionen an Flussmündungen führen wird. Die Nahrungsproduktion der hochgezüchteten Agrarpflanzen wird in hohem Maße betroffen sein und weltweit signifikant abnehmen. Dies kann zu Hungersnöten von Milliarden Menschen führen, sofern die Menschheit es nicht schafft, sich in wenigen Jahrzehnten auf vegane und später vielleicht auf synthetische Nahrung umzustellen. Nachdem der Anteil der unterernährten Menschen über mehrere Jahre hinweg abgenommen hatte, ist seit 2017 ein Anstieg von 7,5 % auf 9,2 % innerhalb von fünf Jahren zu verzeichnen, sodass derzeit schätzungsweise 750 Millionen Menschen hungrig.⁷

Hitzewellen, wie sie in vielen Regionen der Welt und auch in Deutschland zu beobachten sind, führen bereits zu gravierenden Gesundheitsbeeinträchtigungen, insbesondere bei älteren, kranken und schwangeren Personen. In vielen Ländern ist zudem eine abnehmende Verfügbarkeit von Trinkwasser zu verzeichnen, was die Situation weiter verschärfen dürfte. Der sogenannte schnelle Hitzetod kann in Zukunft ganze Regionen heimsuchen, wenn die sogenannte Feuchtkugeltemperatur die Körpertemperatur des Menschen überschreitet. Der schnelle Hitzetod tritt ein, wenn die Kombination aus Temperatur, Feuchtigkeit und Sonneneinstrahlung ein bestimmtes Maß übersteigt und der Kühlmechanismus des menschlichen Körpers aus physikalischen Gründen versagt, d.h. wenn die durch Schwitzen erzeugte Verdunstungskälte nicht mehr ausreichend ist. Die Temperatur, bei der der schnelle Hitzetod eintritt, wird als kritische Temperatur bezeichnet und liegt bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von bspw. 60 % bei einer Außentemperatur von 43 °C, sofern sich die betreffende Person in ruhiger Umgebung im Schatten aufhält. Es ist evident, dass die letalen Werte für Temperatur und Feuchtigkeit bei Sonneneinstrahlung und körperlicher Anstrengung signifikant niedriger liegen. In einigen Weltregionen werden derartige Werte bereits gegenwärtig erreicht, und Prognosen legen nahe, dass große Teile der Bevölkerung in Regionen leben werden, in denen

4 Ripple u.a. 2020.

5 Ripple u.a. 2023.

6 Ripple u.a. 2024.

7 Ritchie/Rosado/Roser 2023.

diese Temperatur-Feuchtigkeitskombination voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten zeitweise überschritten wird. Ohne künstlichen Schutz durch Klimaanlagen oder ähnliche technische Hilfsmittel wird dies insbesondere in den unteren Bevölkerungsschichten zu einem sofortigen Massensterben führen. Es ist daher zu erwarten, dass bis zum Ende des Jahrhunderts mehr als 2.000.000.000 Menschen mit einem Klima konfrontiert sein werden, das ihnen Krankheit, Hunger und einen frühen Tod bereitet.⁸

Durch Kipppunkte zum »Point of no Return«

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass positive Rückkopplungsmechanismen eine fatale Rolle beim anthropogenen Klimawandel spielen. Exemplarisch sei hier auf die folgenden Beispiele verwiesen: Steigt die globale Lufttemperatur, so kommt es zum Schmelzen von Permafrost-Regionen, in denen zusätzliche Ausgusungen von CO₂ und Methan den Klimawandel weiter anheizen. Eine Erhöhung der Meerestemperatur führt zur Freisetzung von Methanhydraten in der Arktis, wodurch zusätzliche Methanemissionen entstehen. Auch das im Meer gelöste anthropogene Kohlenstoffdioxid, welches bereits heute als Kohlensäure die vielfältigen Lebensformen der Schalentiere gefährdet, wird bei einer Temperaturerhöhung wieder teilweise an die Atmosphäre zurückgegeben und dadurch die Klimaerwärmung positiv rückkoppeln. Dürren können Waldbrände verursachen, die ihrerseits CO₂ emittieren. Schneeschmelze führt zu einer Verringerung der Albedo der Erdoberfläche, wodurch sich diese bei Sonneneinstrahlung stärker erwärmt. Eine Vielzahl weiterer positiver Rückkopplungen der Erderwärmung sind zu beobachten, welche auch als Kipppunkte bezeichnet werden. Diese verstärken sich gegenseitig, sodass es in der Folge zu einer Kaskade von ausgelösten Kipppunkten kommen kann.⁹ Ein besonderes, fatales Risiko für das globale Klima birgt das Stocken der atlantischen Umwälzzirkulation (AMOC). Diese ist maßgeblich für den Erhalt des Golfstroms verantwortlich, welcher Europa sein warmes Agrarklima sichert. Die Datenlage zur AMOC lässt den Schluss zu, dass die Zirkulation bereits in den vergangenen Jahrzehnten an Geschwindigkeit verloren hat und möglicherweise in den kommenden Jahrzehnten zum Erliegen kommt. Dies hätte nicht nur verhängnisvolle Konsequenzen für das Leben und die Agrarproduktion in Europa, sondern auch für die globale Agrarproduktion.¹⁰

In Anbetracht dieser prognostizierten Katastrophe vollzieht die Gesellschaft eine Beweismehrung, wodurch sie eine Verhaltensänderung verzögert. Gemäß

8 Ripple u.a. 2024 und Lenton u.a. 2023.

9 Lenton u.a. 2008.

10 Boers 2021.

dieser Logik muss nicht der Verursacher, sondern der Geschädigte den Beweis antreten. Die Verantwortung dafür, den Nachweis zu erbringen, dass ein hoher CO₂-Ausstoß unbedenklich ist, liegt nicht bei der fossilen Industrie, sondern bei den Klimawissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern, die den Beweis zu erbringen haben, dass die Treibhausgase mit Sicherheit zu einer Katastrophe führen, bevor in unserem von Kapitalismus geprägten Wirtschaftssystem drastische Verbote fossiler Brennstoffe politisch durchsetzbar sind. Selbst verantwortungsvolle Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterwerfen sich diesem Diktat und warnen nicht unmissverständlich vor der dramatischen Gefahr, sondern betonen, dass die Datenlage nicht ausreicht, um zum Beispiel das Stocken des AMOC in den nächsten Jahrzehnten eindeutig zu beweisen.

Unter Berücksichtigung aller bekannten Rückkopplungsmechanismen lässt sich konstatieren, dass sich die Erde auf einen »Point of no Return« zubewegt. Ein solcher Zustand bezeichnet einen Zeitpunkt, ab dem eine Rückführung des Erdklimas auf den vorindustriellen Zustand nicht mehr möglich ist. In der Konsequenz wird die Erde sich kontinuierlich erwärmen und ein neues Gleichgewicht bei wesentlich höheren Temperaturen finden, in dem für das Leben, wie wir es kennen, kein Platz ist.¹¹

Der Traum vom andauernden Fortschritt

Über einen Zeitraum von 200.000 Jahren nutzte der moderne Mensch ein rein regeneratives, nachhaltiges Energiesystem. Alle heute bekannten regenerativen Energieformen – Biomasse, Solarenergie, Wind, Wasserkraft und Geothermie – wurden bereits seit jeher vom Menschen energetisch genutzt, bspw. als Nahrung, für Feuer, für Boote, Wärme, Gesundheit und vieles mehr. Aus energetischer Sicht hat die Menschheit in den letzten 150 Jahren einen bedeutenden Wandel vollzogen.

Das Zeitalter der fossilen Energieträger begann mit der Erfindung der Dampfmaschine, die mit Kohle befeuert wurde und den Abbau weiterer großer Mengen Kohle ermöglichte. Die darauf folgende Entdeckung der Möglichkeit, Erdöl in großem Maßstab zu fördern, wurde durch die Erfindung kleiner Verbrennungsmotoren mit der Markteinführung von Automobilen und Flugzeugen verbunden. In der Folge wurden Erdgasfelder mit transkontinentalen Pipelines genutzt, um Häuser zu heizen und in Turbinen Strom zu erzeugen, der im Vergleich zu Kohlekraftwerken sauberer war.

Nach der Demonstration der Kernkraft durch die Atom- und Wasserstoffbombe in den Jahren ab 1945 begann der Traum von Physikern und Militärs nach schier unendlicher Energiebereitstellung in Kernspaltungs- und Kernfusionsreaktoren.

¹¹ Steffen u.a. 2018.

Viele Menschen, vor allem aus dem Bereich der Naturwissenschaften und der Technik, sind der Überzeugung, dass der technische Fortschritt und neuartige Erfindungen, die heute noch nicht einmal in ihrer Gesamtheit vorstellbar sind, die aktuellen und zukünftigen Probleme der Menschheit lösen werden. Dieser Glaube wird insbesondere von den im Wohlstand lebenden Menschen unserer Generation vertreten, die die technologische Entwicklung der letzten Dekaden in vielen Anwendungsbereichen unmittelbar erlebt haben. Aus ökologischer Sicht erscheint dieser Glaube jedoch als unbegründet, denn die Entwicklung der Ökosysteme, der Biodiversität, der Verschmutzung der Meere, der Vergiftung der Böden und die globale Klimaveränderung lassen die Wahrscheinlichkeit einer plötzlichen Wiederherstellung des viele Jahrtausende alten Gleichgewichts des planetaren Lebensraumes des Menschen gering erscheinen. Zu den am häufigsten diskutierten technischen Scheinlösungen im Kontext der Lösung der Klima- und Energieprobleme gehören die CO₂-Sequestrierung, die Kernspaltungs- und Kernfusionsenergie sowie das Geoengineering.

CO₂-Sequestrierung

Anstatt den Fokus auf die Vermeidung von CO₂-Emissionen durch ein Verbot fossiler Brennstoffe zu legen, werden weltweit Anstrengungen unternommen, die bei der Erzeugung anfallenden CO₂-Emissionen aufzufangen oder gar aus der Luft zu filtern und anschließend im Boden zu sequestrieren, also für die Ewigkeit dort einzulagern. Grundsätzlich funktioniert dieses technische Verfahren und wurde anhand von Prototypen demonstriert.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass es bei diesem Vorgehen zu einem entscheidenden Denkfehler kommt, da die grundsätzliche Größenordnungsdiskrepanz zwischen den an idealen Standorten betriebenen Prototypen und dem zu lösenden Problem außer Acht gelassen wird. Die existierenden Prototypen erreichen derzeit eine Sequestrierungsleistung von einer Megatonne pro Jahr für konzentriertes, verflüssigtes CO₂ sowie eine Einfangleistung von wenigen Kilotonnen pro Jahr aus der Luft. In Bezug auf die derzeitigen Emissionen von 37 Gigatonnen pro Jahr entspricht dies einer Größenordnungsdiskrepanz von 37.000 bzw. 37.000.000. Eine Technologie wird aus wissenschaftlicher Perspektive erst dann als nutzbringend erachtet, wenn sie die gleiche Größenordnung wie das zu lösende Problem erreicht. Dies impliziert, dass die Technologie dazu in der Lage sein müsste, etwa 10 Gigatonnen pro Jahr einzufangen, zu verflüssigen, zur Deponie zu befördern und dort für die Ewigkeit zu sequestrieren. Der Prozess des CO₂-Einfangs mit anschließender Sequestrierung erfordert eine signifikante Menge an Infrastruktur-, Rohstoff-, Energie- und Arbeitskraft-Ressourcen, und geeigneter Deponieplatz muss jedes Jahr neu gefunden werden. Diese Aspekte verschärfen das ohnehin schon bestehende Problem der Energie- und Ressourcennutzung. Ein

weiteres Problem besteht darin, dass der Charme der fossilen Energieträger in ihrer kleinteiligen Anwendung in Millionen und Milliarden von Fahrzeugen wie Motorrädern, Autos und Heizungen besteht, deren CO₂-Ausstoß grundsätzlich nicht auf direkte Weise eingefangen werden kann. Die technische Realisierbarkeit der CO₂-Sequestrierung kann demnach gegenwärtig nicht als effektiv bezeichnet werden, da sie die erforderliche Größenordnung nicht erreicht. Gleichwohl vermittelt sie ein stimmiges Bauchgefühl und fungiert für diejenigen, die eine fortgesetzte CO₂-Produktion anstreben, als Feigenblatt.

Kernspaltungsenergie

Seit Jahrzehnten wird Kernspaltungsenergie als CO₂-freie, saubere und sichere Energie als Alternative zu fossilen Brennstoffen angepriesen. Moderne nukleare Technologien werden gegenwärtig häufig als inhärent sicher bezeichnet, da eine Kernschmelze im Regelfall nicht mehr zwangsläufig zu einer Katastrophe führen muss. Ein Versagen der Sicherheitsmaßnahmen, bspw. durch innere Sabotage oder den Einsatz panzerbrechender Waffen durch Terroristen, kann selbstverständlich weiterhin nicht ausgeschlossen werden. Es werden neuartige Technologien angepriesen, die die Kernenergie sicherer und umweltfreundlicher machen. Die Brütertechnologie führt zu einer Reduktion des erforderlichen Brennstoffs sowie des radioaktiven Abfalls. Die Thorium-Technologie ermöglicht die Vermeidung der Produktion von Plutonium und anderen langlebigen Isotopen, während der Einsatz von Flüssigbrennstoffen eine Kernschmelze verhindert, da die Kernbrennstoffe bereits geschmolzen sind. Die Nutzung vieler kleiner Reaktoren statt weniger großer verringert das Nachwärmeproblem. Die genannten technischen Ansätze sind seit vielen Jahrzehnten grundsätzlich bekannt und können jeweils in gewissem Maße zur Verbesserung der Sicherheit von Reaktoren beitragen. Allerdings konnten sie sich in den vergangenen Jahrzehnten wegen anderer Sicherheitsbedenken und aus wirtschaftlichen und militärischen Gründen nicht durchsetzen.

Grundsätzlich kann jeder Kernreaktor nach geringen Modifikationen Plutonium erbrüten. Plutonium ist nicht nur der Stoff, um thermonukleare Bomben zu bauen, sondern gleichzeitig der Stoff, von dem theoretisch zwei Tonnen reichen würden, um alles menschliche Leben auf dem Planeten Erde auszulöschen. Eine inhalierte Dosis von 0,00027 Gramm Plutonium 239 führt mit einem Krebsrisiko von fast 100 % zum Tod.¹² Für eine Applikation in Trinkwasser und Lüftungsschächten ist nicht einmal die Herstellung der oft diskutierten, sogenannten »schmutzigen Bomben« erforderlich, um Angst und Schrecken in der Bevölkerung auszulösen. Der Mensch hat mittlerweile (2016) über 400 Tonnen Plutonium durch Transmutation in

¹² Schweizer Bundesbehörde, <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/gefaehrlichkeit-von-plutonium-239/>. (Zugriff: 05.04.2025).

Kernreaktoren produziert, 30 Tonnen davon befanden sich zu Kriegsbeginn im umkämpften Kernkraftwerk Saporischschja in der Ukraine.¹³

Angesichts der Tatsache, dass in unserer Welt eine Vielzahl von Egozentrikern, Psychopathen und Diktatoren existiert, ist es aus Sicherheitsgründen nicht empfehlenswert, Kernkraftwerke in großer Zahl zu installieren. Auch in diesem Kontext lässt sich eine Diskrepanz hinsichtlich der Größenordnungen beobachten: Viele Befürworter und Befürworterinnen der Kernenergie vertreten die Vorstellung, dass es sich um einzelne, wenige Reaktoren handelt, die fern des eigenen Wohnortes stehen. Um jedoch einen signifikanten Beitrag zur globalen Welterenergieversorgung zu leisten, ist Kernenergie in der gleichen Größenordnung wie der globale Primärenergiebedarf erforderlich. Dies entspricht einer Anzahl von etwa 10.000 großen oder 30.000 bis 100.000 kleinen Reaktoren. Der Primärenergiebedarf Deutschlands kann durch etwa 360 große Reaktoren gedeckt werden.

Kernfusion

Aus physikalischer Perspektive stellt die Kernfusion eine bemerkenswert elegante Form der Energiegewinnung aus Materie dar. Die Kernfusion nutzt Wasserstoff als Brennstoff und ist dazu befähigt, sowohl über einen langen Zeitraum große Mengen Energie zu erzeugen, wie es in unserer Sonne geschieht, als auch mit höchster Konzentration, wie bei unseren Wasserstoffbomben. In Bezug auf die technische Realisierbarkeit lassen sich zwei Methoden zur kontrollierten Kernfusionsreaktor-Technologie unterscheiden: *der magnetische Einschluss* und *die Trägheitsfusion*.

Der *magnetische Einschluss* des Wasserstoff-Plasmas nutzt starke, große Magnetfelder aus kalten, supraleitenden Magneten, um Plasma zu stabilisieren, welches auf Temperaturen aufgeheizt werden muss, die weit über denen im Inneren unserer Sonne liegen. Ein prominentes Beispiel ist der ITER-Forschungsreaktor, dessen Konstruktion 1985 beschlossen wurde und dessen Kosten bis zum Beginn von Tests, voraussichtlich im Jahre 2034,¹⁴ nach Schätzungen von 2014 etwa 50 Milliarden US-Dollar betragen werden. Nach einem erfolgreichen Test von ITER soll der erste Testreaktor konstruiert werden, der zumindest theoretisch in der Lage ist, kommerziell Energie zu liefern. Gegenwärtig ist ein großer öffentlicher Hype um Kernfusion zu verzeichnen, wobei sich moderne Start-ups auf Neuentwicklungen im Bereich starker magnetischer Felder fokussieren, die eine Verkleinerung

13 Norris/Arkin 1999 und IAEA Grossi at Davos: Nuclear Power, Climate Change and Ukraine, Michael Amdi Mad-sen, IAEA Office of Public Information and Communication <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaeagrossi-at-davos-nuclear-power-climate-change-and-ukraine> (Zugriff: 05.04.2025).

14 FAZ, Ein Kommentar von Manfred Lindinger 03.07.2024, <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/fusionsreaktor-iter-bau-verzoegert-sich-und-wird-teurer-19829495.html> (Zugriff: 05.04.2025).

und Verbilligung der Anlagen ermöglichen könnten. Selbst unter Berücksichtigung stärkster Magnete werden magnetische Fusionsreaktoren aus physikalischen Gründen immer groß, teuer und komplex bleiben und wirtschaftlich niemals mit der preiswerten Strombereitstellung aus Photovoltaik (PV) und Batterien konkurrieren können. Auch hier ist das Größenordnungsargument anwendbar: Ein signifikanter Beitrag zum Weltenergieproblem und zum Klimaschutz kann erst dann erwartet werden, wenn 10.000 große Fusionskraftwerke gebaut würden.

Die *Trägheitsfusion* nutzt Wasserstoffkugelchen, die nach dem gleichen physikalischen Prinzip wie eine Wasserstoffbombe explodieren und Energie freisetzen, jedoch mit wesentlich geringerer Wucht. Die Zündung der Miniatur-Wasserstoffbomben erfolgt mittels Laser- oder Teilchenstrahlen in einer Umgebung mit oder ohne Magnetfeld. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass sie zumindest theoretisch in Zukunft miniaturisiert werden kann.

In Deutschland wurde die Forschung an dieser Technologie aufgrund ihrer Nähe zur militärischen Forschung von Massenvernichtungswaffen über Jahrzehnte tabuisiert, wird aber seit 2024 von der Bundesregierung ohne ernsthafte Technikfolgenabschätzungen stark gefördert.¹⁵ Der Zeitraum, den Physiker und Physikerinnen benötigen, um die Trägheitsfusion zu realisieren, ist nach Jahrzehnten intensiver Forschung in den USA und anderen Nuklearmächten weiterhin unklar und erfordert weitere Grundlagenforschung und technische Entwicklung u.a. beim sicheren Umgang mit signifikanten Mengen radioaktiven Tritiums in diesen Reaktortypen. Der nächste logische Schritt der Fusionskraftwerksentwicklung wäre die Zündung eines größeren Plasmas einer echten Wasserstoffbombe mithilfe dieser neuen Technologie, was ganz neue militärische Aspekte insbesondere für Staaten und Terrororganisationen ergibt, die bisher keinen Zugang zu Kernwaffen haben.

Geoengineering

Für Technologiefanatiker und -fanatikerinnen stellt der aktive menschliche Eingriff in das Klimasystem der Erde zur Kompensation der vom Menschen verursachten Erderwärmung das Nonplusultra zur Rettung vor dem Klimawandel dar. Auch hier gilt wiederum das Größenordnungsprinzip: Obwohl eine Vielzahl an Ideen zur Beeinflussung des Klimas existiert, finden lediglich diejenigen Methoden Berücksichtigung, welche eine entsprechende Größenordnung aufweisen und somit in der Lage sind, die Wirkung der 37 Gt CO₂ pro Jahr der vergangenen Jahrzehnte, und zusätzlich die der positiven Rückkopplungsmechanismen, über die kommenden Jahrzehnte und Jahrhunderte zu kompensieren. Die Analyse zeigt, dass die kommenden

¹⁵ BMBF: Förderprogramm Fusion 2040, Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk, https://www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2024/fusion2040_programm.html (Zugriff: 05.04.2025).

Generationen mit einem enormen Aufwand an technologischen und finanziellen Ressourcen konfrontiert sein werden, um die Folgen des Klimawandels zu bewältigen. Es ist zu berücksichtigen, dass eine valide Technikfolgenabschätzung der verschiedenen vorgeschlagenen Technologien sich noch in einer frühen Phase befindet und aufgrund der Komplexität der Ökosysteme auf unserem Planeten in absehbarer Zeit nicht möglich sein wird. Da sich die unterschiedlichen Geotechnologien auf die einzelnen Kontinente und Regionen und auf die Luft- und Meerestemperaturen unterschiedlich auswirken, werden sich Klima und Wettergeschehen auf völlig neue Weise verändern, und zwar teils positiv, teils negativ für die Bevölkerung und die landwirtschaftliche Produktion, so dass diejenigen, die Geoengineering betreiben, mit massivem Widerstand aus den jeweils benachteiligten Regionen rechnen müssen.

Zeitenwende Klimawandel

Gegenmaßnahmen

Die Analyse aktueller Klimaveröffentlichungen hat mir in den letzten Jahren deutlich gemacht, dass alle Bestrebungen, langfristig eine lebensfreundliche Umwelt auf diesem Planeten zu bewahren, mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Scheitern verurteilt sind. Nichtsdestotrotz sollen im Folgenden einige Grundsätze zur »Rettung der Welt« dargelegt werden, die aus der vorliegenden Perspektive am ehesten geeignet sind, die Klimakatastrophe zumindest um einige Jahrzehnte hinauszuzögern. Im Folgenden werden sieben Prinzipien vorgestellt, die als Leitmotive für die »Zeitenwende Klimawandel« dienen können.

Wissenschaftsbasiert

Das erste Prinzip besagt, dass naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten als unveränderlich betrachtet werden und damit die Rahmenbedingungen für unsere Zukunft vorhersehbar bestimmen. Es wird daher als unerlässlich erachtet, dass alle Maßnahmen gegen den Klimawandel mit den wissenschaftlichen Prognosen, wie sie bspw. vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) erstellt werden, in Einklang stehen.

Global und skalierbar

Das zweite Prinzip betont die Notwendigkeit einer globalen Perspektive und einer koordinierten, internationalen Anstrengung, um den Klimawandel zu bekämpfen. Obwohl lokale Beiträge von signifikanter Wichtigkeit sind, ist die Effektivität und Effizienz von Maßnahmen und Technologien an ihre Skalierbarkeit geknüpft. Dies

bedeutet, dass Technologien und Maßnahmen weltweit millionen- und milliardenfach anwendbar sein müssen. Die mangelnde Vorstellung der erforderlichen Größenordnung führt in der Politik häufig zu Scheinlösungen, wie das Beispiel der Verwendung von Mais und Raps als Ersatz für fossile Brennstoffe zeigt.

Existent und einsatzbereit

Gemäß Prinzip 3 sollten bei den Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels die kurzfristig, d.h. innerhalb weniger Jahre, verfügbaren Ressourcen, sowohl technische als auch natürliche, bevorzugt werden. Die Erwartung, dass grundlegend neue Erfindungen wie bspw. Fusionskraftwerke die aktuellen Herausforderungen zeitnah lösen und weltweit eingesetzt werden können, ist nicht realistisch. Statt dessen sollten traditionelle Techniken wie das Bauen mit Holz statt Beton oder die Nutzung von Schienenfahrzeugen für den Güter- und Personenverkehr in Kombination mit modernen Technologien als einfache und bequeme Lösung für viele heutige Probleme betrachtet werden.

Nachhaltig

Technologien, die in Zukunft in großem Maßstab zum Einsatz kommen werden, sollten effizient, rohstoffarm und nachhaltig sein. Darüber hinaus ist anzustreben, dass technische Geräte langlebig, reparierbar und recyclingfähig sind.

Gefahrenbewusst

Die Bereitstellung von Lösungen, die neue und möglicherweise größere Probleme auf anderen Ebenen schaffen, ist zu vermeiden. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Kernenergie genannt, die im Falle eines partiellen Verfalls der Gesellschaft oder in Kriegszeiten die technischen Gefahren dramatisch steigen lassen.

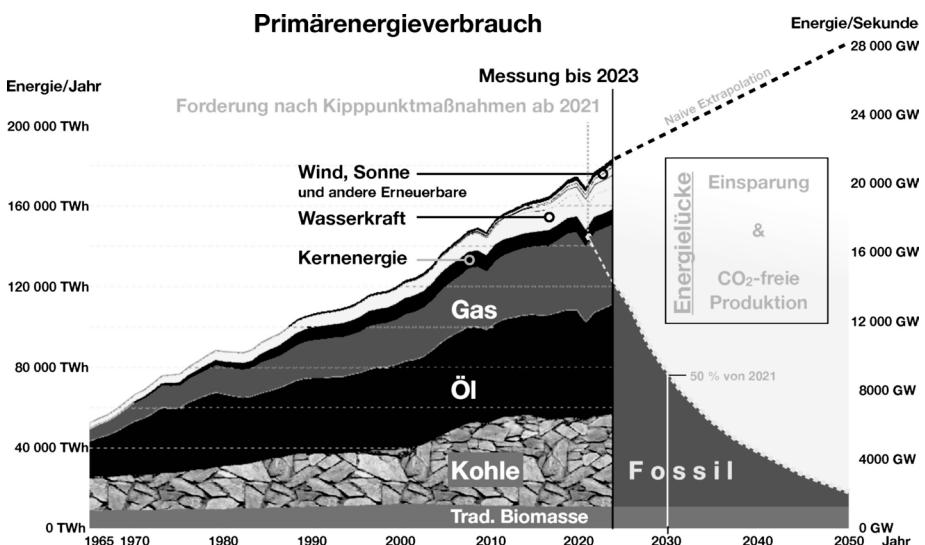
Wirtschaftlich stabil, effizient und gerecht

Die auf Wachstum ausgerichtete kapitalistische Wirtschaft ist instabil und führt zu Wohlstandsunterschieden, die sich destabilisierend auf nationaler und internationaler Ebene auswirken. Die Weltwirtschaft benötigt daher ein stabiles System von Zöllen und Steuern, um lokal ein konstruktives und faires Wirtschaftssystem zu entwickeln, das den Rohstoffbedarf, den Energiebedarf, die Umweltbelastung und die soziale Gerechtigkeit berücksichtigt und diese Faktoren stabil miteinander verknüpft. Die Anpassung unterschiedlicher Bewertungsstandards verschiedener Ländergruppen kann über Import- und Exportzölle erfolgen, die eine faire Weltwirtschaft nach lokalen politischen Maßstäben ermöglichen.

Technologisch robust

Als siebtes und letztes Prinzip sollte bedacht werden, dass der Klimawandel zu einem vollständigen oder partiellen Zerfall der Zivilisation führen kann und damit einhergehend zu einem Verlust von technischen Möglichkeiten, die auf Hochtechnologie beruhen. Während vor 70 Jahren alle essenziellen Technologien zur Not noch in kleinen Werkstätten und Labors hergestellt werden konnten, sind heute für moderne Kommunikations- und Steuerungstechnologien hochspezialisierte Produktionsanlagen mit Fertigungen erforderlich, die aus Kostengründen über mehrere Kontinente verteilt liegen. Im Falle einer Störung der globalen Produktions- und Wirtschaftszusammenarbeit ist es essenziell, dass das Wissen über robuste Technologien ohne den Einsatz hochentwickelter Verfahrenstechniken wiederbelebt werden kann und eine effiziente Wirtschaft weiterhin ermöglicht wird.

Abb. 1: Primärenergieverbrauch



Bildnachweis: Düren mit Daten aus »Our World in Data« based on Vaclav Smil (2017), BP Statistical Review of World Energy; sowie IPCC: The Physical Science Basis; Summary for Policymakers, Climate Change 2019; vgl. Physikkonkret Nr. 66 der DPG (April 2023).

Die Energiefülle

Die Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels des IPCC ist eine unabdingbare Voraussetzung, um den Klimawandel in Zukunft zu stoppen (IPCC, 2013). Aus physikalischer Per-

spektive folgt daraus zwangsläufig eine schnelle Reduktion der Nutzung fossiler Brennstoffe. Trotz Jahrzehntelanger Bemühungen um Klimaschutz steigt der Verbrauch fossiler Brennstoffe seit 1965 fast linear und unvermindert an, wie in Abbildung 1 dargestellt. Würden wir die fossile Energieproduktion so drosseln, dass – entsprechend den Vorgaben durch den IPCC – das $1,5^{\circ}$ - Ziel noch erreicht werden kann, so steuern wir unweigerlich auf eine Energielücke zu, wo Energie knapp und teuer sein wird. Die notwendige Reduktion der fossilen Energien zur Verhinderung der klimatischen Kippelemente ist in Abbildung 1 für das Jahr 2021 berechnet. Die resultierende Diskrepanz zwischen dem fortgeschriebenen Bedarf ohne Klimamaßnahmen und der noch erlaubten Bereitstellung fossiler Energie ist signifikant groß, sodass eine zeitnahe Ersetzung durch erneuerbare Energie (und erst recht durch Kernenergie oder mittels CCS) aus technischen Gründen nicht erreicht werden kann. Ein Systemwechsel ist erforderlich, um dieses Problem zu lösen. Dieser Systemwechsel muss drei Komponenten umfassen:

- a) Es muss massiv Energie eingespart werden, was nur durch einen Systemwechsel in unserem kapitalistisch geprägten Konsumverhalten zu erreichen ist. Beispiele sind die Ächtung von kurzlebigen, energie- und rohstoffreichen Konsumartikeln und Fernreisen, die nicht essenziell sind.
- b) Zudem sind Effizienzsteigerungen in einer Größenordnung nötig, die durch graduelle Verbesserungen nicht mehr zu erreichen ist, sondern nur durch einen Systemwechsel in der genutzten Technologie. Als Beispiele können der Übergang von Glühbirne, Gasheizung und Verbrennungsmotor zu LED, Wärmeppumpe und Elektromotor genannt werden.
- c) Darüber hinaus ist ein massiver Ausbau der Wind-, Solar- und Meeresenergien sowie von Kurz- und Langzeitspeichern erforderlich. Biomasse, Wasserkraft und Kernenergie sollten aufgrund ihres potenziell fatalen Einflusses auf die Umwelt eine untergeordnete Rolle einnehmen.

Im Folgenden werden konkrete Ansätze im Bereich der Energie- und Klimawende vorgestellt:

Energiebereitstellung und Verbrauch

Die Bereitstellung von Energie kann durch erneuerbare Energien erfolgen, welche überall auf der Erde verfügbar sind. Die effiziente Erzeugung von Energie kann in großem Stil durch Photovoltaik-Anlagen, solarthermische Kraftwerke, sowie große Windkraftanlagen on- und off-shore erfolgen. In geeigneten Regionen können darüber hinaus Wasserkraftwerke und geothermische Kraftwerke errichtet werden. Darüber hinaus birgt das Meer ein beträchtliches Energiepotenzial durch Meeresströmungen, Gezeiten und Wellen. Es ist bedauerlich, dass für diese nahezu uner-

schöpflichen Energieformen aus dem Meer bisher keine kommerziellen Großprojekte aufgebaut wurden, obschon vielversprechende Prototypen existieren.¹⁶

Verteilernetze

Durch die Kombination von Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern werden Energieverbraucher und -verbraucherinnen zu simultanen Erzeugern von Energie, was eine signifikante Veränderung im Energiesystem mit sich bringt. In Zukunft werden die regionalen Wechselstrom-Verteilernetze eine entscheidende Rolle beim Ausgleich zeitlicher Fluktuationen in der Erzeugung und im Verbrauch von Strom einnehmen. Ein Umstieg der Haushalte von Gasherden und Gasheizungen auf elektrische Kochgeräte und Wärmepumpen macht den Gasanschluss der Haushalte und die Schornsteine obsolet und reduziert so die jährlichen Wartungskosten des deutschen Erdgasverteilungsnetzes in Milliardenhöhe.

Stromautobahnen

Der Begriff »Stromautobahnen« fungiert als metaphorische Beschreibung für effiziente Fernleitungen, welche den Transport von elektrischer Energie über große Distanzen ermöglichen. Die Versorgung von Metropolregionen und großen, energieintensiven Industrieanlagen unter Nutzung ausschließlich regional erzeugter erneuerbarer Energie ist suboptimal. Aus ökonomischer und ökologischer Perspektive erscheint es vorteilhaft, erneuerbare Energie in großem Umfang dort zu ernten, wo bestimmte Energieformen in Überfluss vorhanden sind. Diesbezüglich sind insbesondere Solarenergie in den Wüstenregionen nördlich und südlich des Äquators sowie Windenergie in Küstenregionen und in den nördlichen und südlichen Westwindregionen zu nennen. Die Nord- und Ostsee sowie die Passatwindregionen bieten ein signifikantes Potenzial für die Nutzung von Windenergie. Die sogenannten »Stromautobahnen« basieren auf Gleichstromleitungen, die mit Spannungen zwischen 300.000 und einer Million Volt betrieben werden. Dadurch ist eine energetische Vernetzung von Regionen mit Abständen von mehreren tausend Kilometern bei geringen Verlusten (unter 3 % pro tausend Kilometer) und geringen Kosten (etwa 1 ct/kWh/1000 km) möglich.¹⁷ Allerdings weisen lokal erzeugter und importierter Strom oft sehr unterschiedliche Effizienzen, Risiken und Umwelteinflüsse auf. Eine adäquate Kombination beider Optionen minimiert die Gesamtkosten unter Wahrung der Energiesicherheit.

16 CorPower Ocean, <https://corpowerocean.com/wave-energy-technology/> (Zugriff: 05.04.2025).

17 Hampp (2024).

Energiespeicher

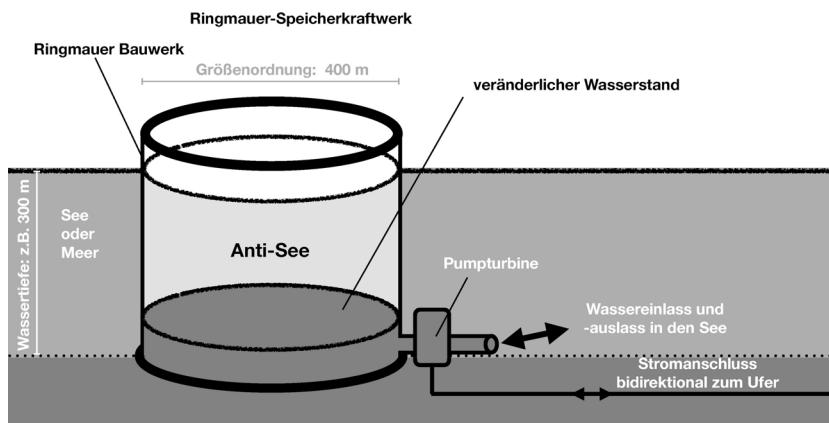
Sowohl die regenerative Stromerzeugung als auch der Verbrauch elektrischer Energie weisen in den meisten Fällen eine hohe Volatilität auf. Es lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Zeitskalen beobachten, sowohl bei der Erzeugung als auch beim Verbrauch von Energie. Auf der einen Seite steht der Tag/Nacht-Zyklus, der insbesondere bei der Solarenergieerzeugung und beim Stromverbrauch eine Rolle spielt. Auf der anderen Seite ist der Jahreszeiten-Zyklus von Bedeutung, der sich auf die Solar- und Windenergie sowie den Stromverbrauch für Heizungen und Klimaanlagen auswirkt. Aus ökonomischen Erwägungen heraus ergibt sich das Zweispeichermodell, welches die Notwendigkeit zweier grundsätzlich unterschiedlicher Energiespeichertypen postuliert. Hierbei handelt es sich um *Kurzzeitspeicher*, welche Energie über Stunden oder Tage speichern und aufgrund der hohen Zykluszahl eine hohe Effizienz aufweisen sollten, sowie um *Langzeitspeicher*, welche über Wochen oder Monate hinweg Energie speichern, aufgrund der geringen Zykluszahl eine geringere Effizienz aufweisen dürfen, jedoch große und kostengünstige Volumina benötigen. Des Weiteren fungieren Langzeitspeicher als strategische Reserve.¹⁸

Kurzzeitspeicher können mittels Batteriespeichern, thermischen Wärmespeichern in Kombination mit solarthermischen Kraftwerken (sogenannten Wüstenkraftwerken) sowie Pumpspeicherkraftwerken realisiert werden. Aufgrund der Notwendigkeit zweier großer Wasserreservoirs auf verschiedenen Höhen stehen konventionelle Pumpspeicherkraftwerke in direkter Konkurrenz zum Naturschutz. Eine vielversprechende Lösung dieses Problems stellen innovative Ringmauer-Pumpspeicherkraftwerken dar.¹⁹ Die Errichtung der Ringmauerbecken erfolgt in einem tiefen See, Tagebaugruben oder auch im Meer, wobei ein vollständiges Abpumpen des Wassers im Inneren erfolgt. In der Konsequenz entsteht ein »Anti-See«, also ein leeres Becken innerhalb eines Sees, das periodisch gefüllt und wieder leergepumpt wird. Auf diese Weise kann das Becken wie ein konventionelles Pumpspeicherkraftwerk zur Stromspeicherung genutzt werden (siehe Abbildung 2). Allein das Hambacher Braunkohlerevier könnte mit einer solchen Anlage zehnmal so viel Energie speichern wie alle bisherigen deutschen Speicherkraftwerke zusammen.

18 Düren 2017.

19 Luther u.a. 2025.

Abb. 2: Ringmauer Speicherkraftwerk



Bildnachweis: Düren

Als Energieträger für *Langzeitspeicher* eignet sich neben Wasserstoff, Methan, Methanol und Ammoniak²⁰ insbesondere Eisenpulver, da es problemlos und in großen Mengen langfristig gespeichert werden kann. Zur Bereitstellung von Energie wird das Eisenpulver in bereits existierenden Kohlekraftwerken zu kostengünstiger Stromerzeugung genutzt. Das als »Asche« entstehende Rostpulver (chemisch Eisen-oxid), welches sich aus der Reaktion des Eisenpulvers mit dem Sauerstoff aus der Luft ergibt, kann anschließend elektrolytisch wieder zu Eisen reduziert werden.²¹ Entgegen der heute üblichen Praxis, moderne Kohlekraftwerke im Zuge der Energiewende abzureißen, sollten diese also stattdessen auf Eisenpulverbrennung umgerüstet werden.²²

Wärme und Klimatisierung

Die Gewährleistung angenehmer Temperaturen ist von essenzieller Bedeutung für den menschlichen Komfort, die Gesundheit sowie die Produktivität. Der Energieverbrauch für die Beheizung und Kühlung von Gebäuden im Winter und Sommer sowie für die Bereitstellung von Wärme zum Duschen, Kochen, Backen und für industrielle Prozesse stellt einen signifikanten Anteil des nationalen Energieverbrauchs dar. Die Kernelemente zur Optimierung des Energieverbrauchs

²⁰ Hampp/Düren/Brown 2023.

²¹ Debiagi u.a. 2022.

²² Janicka u.a. 2023.

bei Wärmeanwendungen sind Wärmeisolation und Wärmerückgewinnung. Es sei darauf verwiesen, dass bei einer adäquaten Isolation und Lüftung mit Wärmerückgewinnung kaum Energie aufgewendet werden muss, um eine konstante Temperatur in einem Raum zu gewährleisten. Darüber hinaus können elektrische Wärmepumpen, in Abhängigkeit von der Außentemperatur, typischerweise das Drei- bis Fünffache der Wärmeenergie bereitstellen, als ihrem Stromverbrauch entspricht. Dieser scheinbare Widerspruch zum Energieerhaltungsgesetz ist darauf zurückzuführen, dass auch kalte Luft und kaltes Wasser Wärmeenergie enthalten, die technisch genutzt werden kann, um Räume zu heizen. In Regionen mit gemäßigten Wintertemperaturen besteht die Möglichkeit, einzelne Räume besonders kostengünstig mit einfachen Klimaanlagen zu beheizen, welche als Luft-Luft-Wärmepumpen betrieben werden können. In Regionen mit strengen Wintern erweisen sich Wärmepumpen, die ihre Wärmeenergie aus sogenannten »kalten Nahwärmenetzen« beziehen, als die optimale Lösung.

Das Wasser in den kalten Nahwärmenetzen weist im Wesentlichen die Temperatur des Erdbodens auf, bspw. 15° C. Im zu heizenden Haus wird mittels Wärmepumpe der Wärmeenergiegehalt des kalten Wassers auf das Temperaturniveau der Zentralheizung (z.B. 40–60° C) erhöht. Die Energie für Nahwärmenetze wird aus geeigneten Wärmequellen der Region gewonnen, wobei häufig ein Fluss oder der Erdboden selbst als Energiequelle dienen. Die oft als Geothermie bezeichnete Erdwärme stammt in diesen Fällen jedoch nicht aus dem Erdinneren, sondern aus dem im Sommer durch die Sonneneinstrahlung aufgeheizten Boden. Diese Form der Erdwärme kann daher als jahreszeitlich gespeicherte Solarenergie bezeichnet werden. Ein zusätzlicher Vorteil dieser Technik besteht darin, dass sie sowohl zum Kühlen als auch zum Heizen genutzt werden kann.

In diesem Kontext ist zudem auf solarthermische Anlagen auf Hausdächern zu verweisen, welche bei adäquater Isolation auch im Winter bei Sonnenschein Temperaturen bis zu 100° C erzeugen können und somit in Kombination mit einem thermischen Wasserspeicher eine lohnende Ergänzung zur Warmwassererzeugung und Heizung darstellen.

Warentransport

Die fortschreitende Industrialisierung und Globalisierung haben zu einer sprunghaften Zunahme des Rohstoffverbrauchs, des Warenkonsums sowie des damit einhergehenden Warentransports geführt. Die wesentlichen Vorteile der Globalisierung der Märkte resultieren ursprünglich aus der Kombination günstiger Rohstoffmärkte, kostengünstiger Arbeitskraftregionen und Weltregionen mit unterschiedlichem Bildungsgrad, Konsumverhalten, Arbeits- und Umweltschutz sowie divergierenden historischen und innovativen Geschäftspraktiken. Infolge einer umfassenden Angleichung der Weltregionen, insbesondere auch durch das Internet, ver-

lieren zahlreiche dieser wirtschaftlichen Globalisierungsvorteile ihre Gültigkeit, sobald die sozialen Unterschiede, der Arbeits- und Umweltschutz sowie die Preise von Rohstoffen sich entweder global angleichen oder zumindest wirtschaftlich durch Zölle eingepreist werden. Im Kontext global agierender Konzerne werden Unterschiede im Bereich der Innovationen und der Produktion durch internen Informationsaustausch und automatisierte Produktionen ohnehin schon selbst zwischen Standorten auf unterschiedlichen Kontinenten nivelliert, was dazu führt, dass eine Warenproduktion in lokalen Fabriken ebenso wirtschaftlich sein wird wie Waren aus globalem Handel. Somit kann in Zukunft der globale Handel stark reduziert werden.

Eine signifikante Reduktion des Rohstoffverbrauchs kann durch den modularen Aufbau von Geräten sowie die Gestaltung der Module in einer Weise, dass eine leichte Reparierbarkeit und eine effiziente Recyclingfähigkeit gewährleistet sind, erzielt werden. Unter der Prämisse einer umfassenden Kreislaufwirtschaft wird der Transport von Rohstoffen zukünftig fast überflüssig, da diese in den lokalen Märkten als recyclingfähiger Abfall anfallen und in die Produktion zurückfließen können.

Der Internethandel wird häufig kritisch betrachtet, da er zur Vernichtung lokaler Arbeitsplätze im Handel und Vertrieb führt und die Machtposition globaler Konzerne stärkt. Eine nüchterne Betrachtung zeigt jedoch, dass der Internethandel für viele Warengruppen der effizienteste und ressourcenschonendste Weg ist, die Kundinnen und Kunden mit dem passenden Artikel zu versorgen. Auch im Kontext des Internethandels besteht die Möglichkeit, die Kundenberatung, die lokale Warenpräsentation in Showrooms sowie die Produktion, die Warenlogistik und den Transport in der Hand lokaler Akteure zu belassen, sofern die Gesetzgebung entsprechende Vorgaben gegen die Marktbeherrschung einzelner großer Akteure definiert.

Mobilität

Die signifikant angestiegene Mobilität der Menschen im industriellen Ölzeitalter sollte in Zukunft deutlich reduziert werden um Energie einzusparen. Die direkte Kommunikation in virtuellen Räumen, einfache Video- und Telefonkonferenzen, internetbasierte Arbeitsprozesse, Heimarbeit und die Schaffung von Coworking-Büros am Wohnort statt der Nutzung von Büros in der Firma der benachbarten Großstadt ermöglichen eine angenehme und effiziente Arbeitswelt mit geringer Mobilität und entsprechend geringem täglichen Zeitverlust. Unverzichtbare Mobilität sollte auf kurzen Distanzen mit kleinen, leichten, mit Muskelkraft oder elektrisch betriebenen, energieeffizienten Fahrzeugen (Roller, Fahrrad, Pedelec, Scooter, Motorrad, Rollstuhl, Rikscha, Kleinwagen, Kleintransporter) und auf längeren Distanzen mit einem effizienten und komfortablen, wenn möglich schienbasierten Gemeinschaftstransportmittel (ÖPNV, Bus, Straßenbahn, U-Bahn, Bahn, Fähre) erfolgen. Diese Forderungen stehen im Einklang mit der Erkennt-

nis, dass tägliche Bewegung zu Fuß und auf dem Fahrrad das Risiko von Herz- und Kreislauferkrankungen sowie das Risiko, an Krebs zu sterben, signifikant reduziert.²³

Die Straßenbahn als zentrales Verkehrsmittel für die Verkehrswende

Der motorisierte Individualverkehr, welcher das heutige Verkehrssystem maßgeblich bestimmt, basiert auf Autos und Lastkraftwagen, die sich individuell gesteuert auf einem dichten Netz aus Straßen bewegen. Die Versiegelung von Flächen durch Schnellstraßen, die eine typische Breite von 30 Metern aufweisen, stellt einen signifikanten Verlust an Natur- und Lebensraum für Menschen, Tiere und Pflanzen dar. Zudem erfordert die regelmäßige Erneuerung der Straßenbeläge aus Asphalt oder Beton bei hohem Verkehrsaufkommen einen hohen Ressourcenaufwand. Ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen ist, ist die Verschmutzung der Meere durch Mikroplastik, die hauptsächlich durch Reifen aus synthetischen Kautschuken verursacht wird. Asphalt und Autoreifen sind Nebenprodukte der fossilen Ölindustrie, deren Verfügbarkeit und Einsatz in Zukunft nicht mehr zu erwarten ist. Auch der Bau von Straßen aus Beton sollte zukünftig vermieden werden, da dieser einen hohen CO₂-Fußabdruck aufweist.

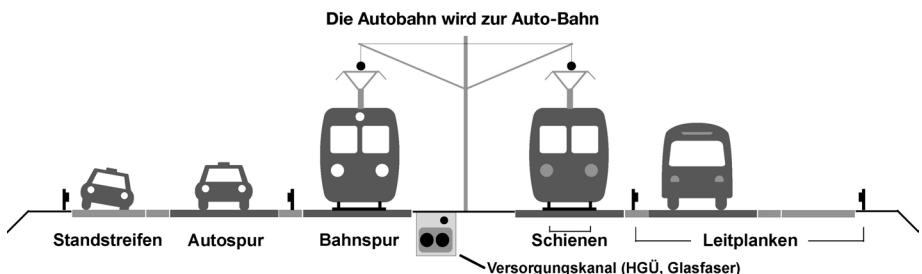
Vergleicht man den Schienenverkehr mit dem Straßenverkehr, so lassen sich mehrere signifikante Vorteile feststellen. Die beim Fahren auftretenden Hauptkräfte sind die Zentrifugalkräfte, die beim Schienenverkehr durch die Schienen aufgenommen werden. Beim Straßenverkehr hingegen müssen sie durch Haftreibung kompensiert werden, was zu Reifenabrieb und bei schlechten Wetterbedingungen oft zu Unfällen führt. Der Zusammenstoß mit dem Gegenverkehr und das Auffahren auf ein stehendes Fahrzeug können beim Schienenverkehr mit moderner Leittechnik problemlos verhindert werden. Weitere Vorteile sind die wesentlich schmalere Trasse, die geringere Bodenversiegelung, die verminderte Emission von Mikroplastik sowie die nicht notwendig werdende regelmäßige Erneuerung von Reifen und Straßenbelag. Ein energetischer Hauptvorteil ist, dass die Rollreibung von Schienenfahrzeugen um den Faktor 10 geringer als bei Gummireifen auf rauer Straße ist.²⁴ Moderne Triebwagen weisen aufgrund ihrer aerodynamischen Form, ihres elektrischen Oberleitungsantriebs sowie der Möglichkeit zur Rekuperation beim Bremsen und Bergabfahren weitere energetische Vorteile auf.

²³ Deutsches Ärzteblatt, 5.9.24 <https://www.aerzteblatt.de/nachrichten/154110/Krebshilfe-spricht-sich-fuer-taeglich-unbenotete-Schulsportstunde-aus> (Zugriff: 05.04.2025).

²⁴ Umweltbundesamt, 5.3.2024, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#--4> (Zugriff: 05.04.2025).

Umweltschützerinnen und Umweltschützer fordern daher zu Recht den Umstieg vom Individualverkehr auf den Schienenverkehr. Jedoch ist auch hier das Größenordnungsargument zu berücksichtigen: Um einen signifikanten Wandel zu bewirken, ist es erforderlich, den Großteil des Verkehrs und nicht nur einen geringen Anteil auf die Schiene zu verlagern. Das bestehende Schienennetz ist jedoch nicht geeignet, da es weder eine hinreichende Flächenabdeckung noch die erforderliche Transportkapazität aufweist. Ein signifikanter Ausbau der Eisenbahntrassen würde jedoch zu einer weiteren Zerstörung von Umweltschutz- und Biodiversitätsflächen führen, da Ausbauflächen in dicht besiedelten Gebieten wie Deutschland nur begrenzt zur Verfügung stehen. Die einzige flächenschonende Alternative ist demnach der Aufbau eines Schienennetzes auf den bereits bestehenden Autobahnen, Schnellstraßen, Bundesstraßen, Landstraßen und Durchgangsstraßen der Städte und Dörfer. In der Konsequenz wird die Bahn zur Straßenbahn, im Folgenden kurz »Tram« genannt und die Autobahn zur Auto-Bahn (siehe Abbildung 3)²⁵.

Abb. 3: Die Autobahn wird zur Auto-Bahn



Bildnachweis: Düren

Die Zugtechnik dieser Tram muss grundlegend neu konzipiert werden, um sowohl auf kurzen als auch auf Langstrecken eine attraktive Beförderung von Personen und Gütern zu gewährleisten. Dies erfordert eine umfassende Überarbeitung in Bezug auf Komfort, Länge, Gewicht und Wendigkeit. Die Mitführung einer Batterie erlaubt den elektrischen, allradangetriebenen und automatisch zu längeren Zügen koppelbaren Trams auf Strecken abwechselnd mit und ohne Oberleitung zu fahren. Dadurch wird die sonst übliche Reichweitenbegrenzung der E-Mobilität aufgehoben. Die Durchfahrung von Steigungen sowie Straßentunneln der bestehenden Straßeninfrastruktur stellt für diese Trams kein Problem dar. Autonomes Fahren

25 Düren 2021.

wird bei der Tram zur Trivialität, da die Züge keiner Lenkung bedürfen und Weichen zentral koordiniert werden können. Es wird vorgeschlagen, die Batterien der Trams, die lediglich abschnittsweise benötigt werden, einer dualen Nutzung zu unterziehen. Sie können ebenfalls zur Stabilisierung des nationalen Stromnetzes als Kurzzeitspeicher eingesetzt werden.

Aufgrund der angestrebten hohen Fahrgastzahlen im ÖPNV werden die Taktzeiten der Fahrpläne kurz sein und die Straßenbahnbetreiber können über Mobiltelefone spezielle »On Demand«-Züge anbieten, die die Fahrgäste ohne Umsteigen an ihr Ziel bringen. Solche Direktfahrten eignen sich insbesondere für mobilitätseingeschränkte Personen als auch für den Güterverkehr und Fernreiseziele.

Ein abruptes Ende des Systems der Personen- und Lastkraftwagen zugunsten eines Tram-Systems ist jedoch nicht realisierbar. In Übergangszeiten besteht die Möglichkeit, den Individualverkehr schrittweise durch folgende alternative Systeme zu ersetzen: Zunächst werden Busse und LKWs eingesetzt, die mit Batterien energieeffizient angetrieben werden. Diese können in automatischen Wechselstationen in den Pausenzeiten der Fahrerinnen und Fahrer durch volle Batterien ersetzt werden. Zudem kann bei einem Wechsel des Individualverkehrs zum Gruppentransport durch die steigenden Passagierzahlen zusätzlich zum Linienverkehr ein komfortabler Reiseverkehr »on demand« eingeführt werden. Anschließend können auf vielbefahrenen Routen statt der Einzelbusse die in China entwickelten autonomen Straßenbahnen genutzt werden, die 500 Passagiere in einem Fahrzeug effizient transportieren können. Diese Fahrzeuge verfügen über keine Schienen, sondern nutzen gestrichelte Linien auf der Fahrbahn, welche dem autonomen Lenksystem als Orientierungshilfe für die Spurhaltung dienen. Das sogenannte »Autonomous Rail Rapid Transit (ART)« System weist aufgrund der Gummireifen nicht all die energetischen Vorteile auf, die mit dem Schienenverkehr assoziiert werden. Nichtsdestotrotz kann es als Übergangssystem zum echten Schienenverkehr wertvolle Dienste leisten und später nach Aufbau der entsprechenden Schieneninfrastruktur schrittweise durch Schienenfahrzeuge ersetzt werden.

Die biologische Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre

Es besteht seit geraumer Zeit Konsens darüber, dass eine Reduktion der anthropogenen CO₂-Zufuhr allein nicht mehr ausreicht, um die Erderwärmung zu stoppen. Zusätzlich wird, wie auch vom IPCC gefordert, die Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre als unabdingbar angesehen. Zu diesem Zweck bestehen technische und biologische Optionen. Die in einem vorherigen Kapitel dargestellte technische CO₂-Sequestrierung wurde aufgrund der enormen zusätzlich nötigen materiellen und energetischen Ressourcen verworfen, weshalb biologische Methoden als einzige realisierbare Option für die großmaßstäbliche Anwendung verbleiben.

Die *biologische Lösung* des Treibhausproblems bedarf eines Paradigmenwechsels: Die Technik darf die Natur nicht zerstören und ersetzen, sondern die Technik muss die Natur unterstützen, um dieses Problem zu lösen. Im Karbonzeitalter, welches vor 350 Millionen Jahren begann, wies die Atmosphäre eine doppelt so hohe CO₂-Konzentration auf wie heute. Die Photosynthese ermöglichte es der Natur, das CO₂-Gas mithilfe der Energie der Sonne aus der Atmosphäre herauszufiltern und es in Kohlenwasserstoffverbindungen umzuwandeln und schließlich nicht als CO₂ sondern als vergleichsweise ungefährliche und haltbare Kohlenstoffverbindungen in Form von Steinkohle über Millionen Jahre hinweg im Boden zu speichern. Erst im Tertiär entstanden Lebewesen, die das Lignin abgestorbener Bäume abbauen konnten. Dies führte zu einer signifikanten Reduktion der globalen Kohlenstoffeinlagerung, da seither die Bildung von Kohle ausschließlich unter Luftabschluss stattfindet. Es ist bemerkenswert, dass ein signifikanter Anteil der über Jahrmillionen entstandenen fossilen Rohstoffe innerhalb nur eines Jahrhunderts durch den Menschen verfeuert und in Form von CO₂ in die Atmosphäre emittiert wurde.

Es stellt sich die Frage, ob es realistisch ist, davon auszugehen, dass die Natur mit unserer Hilfe den damals Jahrmillionen dauernden Prozess der CO₂-Karbonisierung heute in wenigen Jahrzehnten wiederholen könnte. Eine Größenordnungsbetrachtung zeigt, dass die jährliche globale Produktion von Biomasse um ein Vielfaches mehr CO₂ entnimmt, als es für einen ausgeglichenen Kohlenstoffhaushalt erforderlich wäre. Diese Schlussfolgerung lässt sich unmittelbar aus dem Verlauf der Keeling-Kurve ableiten, die eine deutlich steilere jahreszeitliche Schwankung aufzeigt als die Zunahme des CO₂ im Jahresmittel, welche die anthropogene Zunahme enthält. Die anthropogene Summe entspricht einer Menge von 37 Gt CO₂. Im Gegensatz zur technischen CCS-Methodik, bei der das für atmende Lebewesen potentiell gefährliche CO₂ deponiert wird, wird bei der biologischen Methode lediglich der Kohlenstoff im Boden deponiert. Infolgedessen verringert sich die Menge nach Abzug des Sauerstoffs auf »nur« 10 Gt Kohlenstoff, die im Boden jährlich vergraben werden müssten.²⁶

Es sei darauf verwiesen, dass die jährliche Kohlenstoffproduktion in der Regel im Gleichgewicht mit der jährlichen Zerstörung der Biomasse durch Verrottung, Verbrennung und der Vertilgung der Pflanzen durch Menschen und Tiere steht. Dieses Gleichgewicht wurde in der Vergangenheit durch die Änderung der Bodennutzung gestört und hat den Treibhauseffekt noch verstärkt. Allerdings ist der Mensch in der Lage, dieses Gleichgewicht so zu beeinflussen, dass der Klimawandel abgemildert und sogar zurückgedreht werden kann. Als praktische Beispiele können die Aufforstung von neuen Wäldern, der Humusaufbau des Bodens und die Anreicherung von Torf in Mooren genannt werden. Ferner war und ist die Nutzung von Biomasse als Rohstoff in der Materialwirtschaft von großer Bedeutung, wobei Holz,

26 Molekülmassenverhältnis CO₂/C=(12+2*16)/12=3,7.

biogene Karbonfasern oder andere biogene chemische Kunststoffe für den Möbel-, Häuser- und Fahrzeugbau sowie für die thermische Isolation langfristig verbaut werden.

Die Methode der Sequestrierung von biogenem Kohlenstoff als Humus, in Mooren, in Baumaterialien oder direkt als Holzkohle verspricht daher vielversprechende Ergebnisse, da sie sich millionen- und milliardenfach skalieren lässt. Die entsprechenden Technologien waren bereits in der Antike bekannt und konnten von der einfachen Bevölkerung, d.h. von Bauern, Walddararbeitern, Förstern, Zimmerern, Schreinern und Bootsbauern, bis hin zu Köhlern angewendet werden. Regionen, die sich aufgrund ihrer naturräumlichen Gegebenheiten nicht für eine intensive Landwirtschaft eignen, jedoch ein großes Potenzial für die Produktion von Biomasse in Form von Bäumen, Sträuchern, Schilf, Bambus und zahlreichen weiteren Pflanzenarten aufweisen, sind weltweit vorhanden. Diesbezüglich sind insbesondere entlegene Regionen zu nennen, die sich vom Norden Sibiriens bis zu den Steppenregionen in den Subtropen erstrecken. Bei dieser Methode wird die aufwendige und energieintensive CO₂-Entnahme aus der Atmosphäre durch Pflanzen realisiert, welche die erforderliche Energie von der Sonne bereitgestellt bekommen. Eine Umwandlung von Biomasse in Holzkohle erfolgt durch Pyrolyse. Diese verläuft exotherm, sodass keine externe Energiezufuhr für die Herstellung der Holzkohle notwendig ist. Stattdessen kann die beim Pyrolyseprozess entstehende Wärme genutzt und die entstehenden wasserstoffhaltigen Gase und Flüssigkeiten gespeichert und bspw. lokal zum Kochen verwendet werden.

Vor kurzem wurde entdeckt, dass eine Pyrolyse gar nicht nötig ist, um Kohlenstoff aus Biomasse dauerhaft der Atmosphäre zu entziehen. Es besteht die Möglichkeit, dass es ausreicht, Baumstämme in Holzgräbern zu deponieren, sofern der umgebende Boden (z.B. feuchter Lehmboden) einen luftdichten Abschluss des Holzes ermöglicht.²⁷

Die Voraussetzung für die Nutzung dieser verschiedenen Arten der Sequestrierung ist jedoch, dass die entsprechenden Techniken, Methoden und Geräte auf einen modernen Stand gebracht werden und die Milliarden an Fördergeldern zur CO₂-Sequestrierung sowie die wertvollen CO₂-Zertifikate nicht an technische Großkonzerne, sondern an einfache Bauern, Förster und Köhler gehen, die das CO₂ durch biologische Methoden aus der Atmosphäre holen. Es ist zu prognostizieren, dass die Akzeptanz der Bevölkerung für Klimaschutzmaßnahmen dadurch signifikant ansteigt, wenn Handwerker, Land- und Forstwirte und -innen selbst integraler Bestandteil und Nutznießer des Klimaschutzes werden.

27 Zeng u.a. 2024.

Der demokratische Kapitalismus

Angesichts des fortschreitenden Klimawandels ist eine grundlegende wirtschaftliche Reform von zentraler Bedeutung. Der Kapitalismus hat in bekannter, effizienter und divergierender Manier die natürlichen Lebensbedingungen des Menschen in umfassender Weise zerstört. Die verbleibende Zeit für den Umschwung zu einem effizienten, ressourcenschonenden und nachhaltigen System ist zu kurz, um sich allein auf ein kapitalistisches »Trial-and-Error«-System zu verlassen, das von ideologischen Überzeugungen »Der Markt wird das schon richten« geleitet wird. Gegenwärtig unterschreiten die technologischen und demografischen Veränderungen die Zeitkonstanten, die für die Optimierung der wirtschaftlichen Prozesse durch Iteration und Interaktion der Marktteilnehmer und -innen in einem freien Markt erforderlich wären. Ein eindimensionaler, staatlich gesteuerter Wirtschaftstyp wäre jedoch auch nicht zielführend, da die Marktbedingungen als zu komplex für eine externe Steuerung angesehen werden müssen. Dies gilt insbesondere, wenn derartige Steuerungen – wie in der ehemaligen DDR – auf ideologischen oder politischen Vereinfachungen statt auf detaillierten Marktdaten und deren komplexer mathematischer Analyse beruhen. In Phasen der Transformation ist es daher erforderlich, sowohl die Dynamik unternehmerischen Handelns zu nutzen, um den Markt von innen heraus zu optimieren, als auch eine substanzelle staatliche Förderung und eine ausgewogene Richtungsvorgabe für industrielle Innovationen zu gewährleisten, um zu fördern, was für die Gemeinschaft nützlich ist, aber auszubremsen, was zwar gewinnbringend, aber gesellschaftlich oder umweltpolitisch schädlich ist. Die Entscheidung über diese Aspekte ist eine politische Aufgabe, die in einer pluralistischen Gesellschaft auf demokratische Weise getroffen werden sollte.

Dieses, hier als »demokratischer Kapitalismus« bezeichnete Wirtschaftsmodell ergänzt also die staatlichen Strukturen um die bisher scheinbar vergessene demokratische Kontrolle über die Produktionsmittel. Die Gemeinschaft soll nicht nur wie bisher vor Umweltschäden und unmenschlichen Arbeitsbedingungen in den Betrieben geschützt werden, sondern sie soll auch darüber entscheiden können, welche Güter und Dienstleistungen sie produzieren möchte und welche nicht, in welche Produktionsmittel investiert werden soll, und ob unter Abwägung sozialer Aspekte Großbetriebe geschlossen werden sollen oder die Produktion an diesem Standort auf andere Waren umgestellt werden soll. Die durch die Produktion erwirtschafteten Gewinne basieren einerseits auf einer effizienten Geschäftsführung, andererseits auf der Arbeit und engagierten Zusammenarbeit der Angestellten, vor allem aber auf der Kunst von Wissenschaftlern und Wissenschaftlerinnen, die schon Jahrzehnte zuvor durch ihre Forschung und Entwicklung die Produktionsmittel ermöglicht haben, die heute den Gewinn erwirtschaften. Unter der Annahme, dass die finanziellen Investitionen und Richtungsentscheidungen der Großbetriebe von demokratischen und staatlichen Gremien auf effektive Weise übernommen wer-

den, verbleibt für Aktionäre und Milliardäre keine Aufgabe und schon gar keine Befreiung an den Gewinnen der Produktionsanlagen beteiligt zu werden. In der Konsequenz können die Gewinne an den Staat zurückfließen und den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen inklusive der Geschäftsführung angemessene Einkommen garantieren. Das beschriebene Wirtschaftssystem mag ungewöhnlich erscheinen, jedoch kann aus der Perspektive eines Wissenschaftlers in der Grundlagenforschung versichert werden, dass dieses System in Großforschungseinrichtungen seit Jahrzehnten praktiziert wird und seine Effizienz unübertroffen ist. Als Beispiel sei das CERN in Genf genannt, welches international und kulturübergreifend sowohl in den grundlegenden Richtungsentscheidungen als auch in den konkreten Projekten eine sehr demokratische Führungsstruktur aufgebaut hat. Die dort hochmotiviert arbeitenden Wissenschaftler, Wissenschaftlerinnen und anderen Angestellten leisten außergewöhnliche Beiträge für die Gesellschaft.

Das derzeitige kapitalistische System zeichnet sich durch eine Tendenz zur Konzentration von Reichtum bei einer kleinen Gruppe von Superreichen aus. Dieser Prozess ist durch eine positive Rückkopplung gekennzeichnet, die durch die Begünstigung finanziell potenter Akteure im Wettbewerb entsteht. Zweitens ermöglicht der stark wachsende Finanzkapitalismus mit zunehmender Marktdominanz die geschickte Manipulation von Finanzderivaten, insbesondere im Bereich virtueller Währungen. Internationale Freihandelsabkommen erlauben es Großkonzerne, ihre Macht auf globaler Ebene auszubauen und Arbeitsbedingungen, Löhne sowie politische Entscheidungsträger und -trägerinnen zu ihren Gunsten zu nutzen. Durch den Aufkauf von Medien, insbesondere sozialen Medien, und der Nutzung künstlicher Intelligenz, wird heute die Meinungsbildung der Bevölkerung effizient manipuliert. Es ist bekannt, dass einige Akteure versuchen, unsere demokratischen Staatsapparate auf diese Weise zu kapern.

In einem »demokratischen Kapitalismus« wären derartige Exzesse durch eine gesellschaftliche Kontrolle der Produktionsmittel sowie die Begrenzung der Möglichkeit, Macht durch Reichtum zu erlangen, unterbunden. Zum Erhalt der gesellschaftlichen Stabilität und einer lebensfreundlichen Umwelt sind bedingte Grundeinkommen, Vermögenssteuern, Steuern auf fossile Brennstoffe und andere umweltschädigende Waren und Dienstleistungen geeignete Mittel, um den freien Markt zu lenken. Ein solcher Sozialstaat steuert grundlegende Entscheidungen in den Bereichen Ernährung, Gesundheit, Konsum und Technologie, und er gibt den Bürgern und Bürgerinnen ausreichend Freiheit und Entfaltungsmöglichkeiten in den Bereichen des kleinen und mittleren Unternehmertums, der Forschung und der Kunst. Zudem sorgt er für die Schwachen und verhindert Kriminalität, Machtmissbrauch, Korruption und die Verschwendungen von Ressourcen. Die Aufteilung der wirtschaftlichen Gewinne auf das Individuum sowie auf die Gemeinschaft wird durch signifikante Einkommens- und Mehrwertsteuern sichergestellt. Ein wirksames Mittel, um die eigene Staatengruppe vor ausländischen Akteuren zu

schützen, die in Bezug zu sozialen und umweltpolitischen Kriterien ein abweichendes Wertesystem in ihrer Wirtschaft praktizieren, sind Ein- und Ausfuhrzölle.

Schlusswort

Aus wissenschaftlichen Beobachtungen folgt inzwischen eindeutig, dass die Menschheit den Weg in eine ökologische Apokalypse eingeschlagen hat. Ein Zusammenbruch der menschlichen Zivilisation mit Milliarden Toten erscheint wahrscheinlich und ist die logische Konsequenz des schon heute zu beobachtenden Massensterbens im Bereich der Biodiversität sowie der Tatsache, dass die pflanzlichen und tierischen Grundlagen der Ernährung der enorm angewachsenen Zahl der Menschen durch den Klimawandel in Frage gestellt werden müssen.

Ein rasches Umschwenken der menschlichen Gesellschaften hin zu einer gemeinschaftlichen Rettung der Biosphäre setzt voraus, dass die Gefahr in ihrem Ausmaß vollumfänglich erkannt wird und es zu einem gesellschaftlichen Tabu wird, auch nur das Geringste zu unternehmen, was der Biosphäre schadet. Es wurde dargelegt, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt die optimalen technischen Optionen bekannt sind, die nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik die Krise überwinden und eine nachhaltige Lösung herbeiführen könnten, sofern sie konsequent umgesetzt würden. Das derzeitige Konzept der freien Marktwirtschaft ist jedoch aufgrund seiner Trägheit, Instabilität und fehlenden Steuerungsmöglichkeiten auf globaler Ebene nicht in der Lage, zeitnah die erforderlichen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Marktveränderungen zu generieren. Stattdessen wird ein neues Wirtschaftsmodell vorgeschlagen, der »Demokratische Kapitalismus«. Dieses Wirtschaftssystem soll sich durch Nachhaltigkeit, Stabilität und leichte Steuerbarkeit auszeichnen und in der Lage sein, schnell und effizient auf den planetaren Notstand zu reagieren. Die Frage, ob ein solches Vorgehen in dem fortgeschrittenen Stadium der Umweltzerstörung und des Klimawandels den Planeten noch retten kann, wird sich möglicherweise schon bald herauskristallisieren. In negativer Hinsicht spätestens dann, wenn die Kippelemente des Klimawandels einen Pfad einschlagen, bei dem die begrenzten, menschlichen Einflüsse auf die globalen Naturkräfte keinen signifikanten Einfluss mehr haben werden.²⁸

²⁸ Der Text wurde unter Zuhilfenahme von Software-, Internet- und KI-Tools entwickelt (Apple-Mac, Keynote, Word, Safari, Wikipedia, Google search, ChatGPT, DeepL) und beruht inhaltlich auf der Arbeit und Kommunikation mit zahlreichen Autoren wie Autorinnen, Gesprächspartnern wie Gesprächspartnerinnen und Arbeitsgruppen (Scientists for Future, Arbeitskreis Energie an der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sustainable HECAP+ Initiative, Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung an der JLU-Gießen, DESERTEC Foundation, The Alliance of World Scientists, u.v.a.)

Literatur

- Niklas Boers, Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation, in: *Nature Climate Change* 11 (2021), 680–688. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4> (Zugriff: 05.04.2025).
- Paolo Debiagi/Rudolfo C. Rocha/Arne Scholtissek/Johannes Janicka/Christian Hasse, Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy. Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 165 (2022), 112579, ISSN 1364–0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579> (Zugriff: 05.04.2025).
- Michael Düren, Understanding the Bigger Energy Picture – DESERTEC and Beyond, SpringerBriefs in: *Energy*, 2017, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57966-5> (Zugriff: 05.04.2025).
- Michael Düren, Das Ende der Autobahn – Energie und Mobilität aus Sicht eines Physikers, in: *Physik Journal* 20 (2021) Nr. 8/9, 68.
- Johannes Hampp/Michael Düren/Tom Brown, Import options for chemical energy carriers from renewable sources to Germany. *PLoS ONE* 18(2) (2023): e0262340. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281380> (Zugriff: 05.04.2025).
- , Flexing with lines or pipes. Techno-economic comparison of renewable electricity import options for European research facilities. *PLoS ONE* 19/2 (2024): e0292892. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292892> (Zugriff: 05.04.2025).
- Johannes Janicka/Paolo Debiagi/Arne Scholtissek/Andreas Dreizler/Bernd Eppele/Reiner Pawellek/Alexander Maltsev/Christian Hasse, The potential of retrofitting existing coal power plants: A case study for operation with green iron, in: *Applied Energy* 339 (2023), 120950, ISSN 0306–2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120950>. (Zugriff: 05.04.2025).
- Daniel Kahneman, *Schnelles Denken, Langsames Denken*. München 2012.
- Timothy M. Lenton/Hermann Held/Elmar Kriegler/Jim W. Hall/Wolfgang Lucht/Stefan Rahmstorf/Hans Joachim Schellnhuber, Tipping elements in the Earth's climate system, in: *PNAS* (105) 2008, Nr. 6, 1786–1793, doi:10.1073/pnas.0705414105 (Zugriff: 05.04.2025).
- u.a., Quantifying the human cost of global warming, in: *Nature Sustainability* 6 (2023), 1237–1247.
- Gerhard Luther/Michael Düren/Henry Risse/Horst Schmidt-Böcking, Unterwasser-Pumpspeicherkraftwerke im Tagebauloch, Teil 2: Ideale Kurzzeit-Stromspeicher. *Phys. Unserer Zeit* 202401722. <https://doi.org/10.1002/piuz.202401722> First published: 11 February 2025 (Zugriff: 05.04.2025).
- Robert S. Norris/William M. Arkin, World Plutonium Inventories, in: *Bulletin of the Atomic Scientists* 55 (1999), 71. <https://doi.org/10.2968/055005016> (Zugriff: 05.04.2025).

- Geoffrey Supran/Naomi Oreskes/Stefan Rahmstorf, Assessing ExxonMobil's global warming projections, in: *Science*, 13 Jan 2023, Vol. 379, Issue 6628, DOI:10.1126/science.abk0063.
- William J. Ripple/Christopher Wolf/Thomas M. Newsome/Phoebe Barnard/William R. Moomaw, World Scientists' Warning of a Climate Emergency, in: *BioScience* 70 (2020), Issue 1, January, 8–12, <https://doi.org/10.1093/biosci/bizo88> (Zugriff: 05.04.2025).
- /Christopher Wolf/Jillian W Gregg/Johan Rockström/Thomas M. Newsome/Beverly E Law/Luiz Marques/Timothy M Lenton/Chi Xu, Saleemul Huq/Leon Simons/Sir David Anthony King, The 2023 state of the climate report. Entering uncharted territory, in: *BioScience* 73 (2023), Issue 12, December, 841–850, <https://doi.org/10.1093/biosci/biado80> (Zugriff: 05.04.2025).
- /Christopher Wolf/Jillian W Gregg/Johan Rockström/Michael E Mann/Naomi Oreskes/Timothy M Lenton/Stefan Rahmstorf/Thomas M Newsome/Chi Xu/Jens-Christian Svenning/Cássio Cardoso Pereira/Beverly E Law/Thomas W Crowther, The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth, in: *BioScience* 74 (2024), Issue 12, December 2024, 812–824, <https://doi.org/10.1093/biosci/biae087> (Zugriff: 05.04.2025).
- Hannah Ritchie/Pablo Rosado/Max Roser, »Hunger and Undernourishment«. Published online at: OurWorldinData.org, 2020: <https://ourworldindata.org/hunger-and-undernourishment> [Online Resource] (Zugriff: 05.04.2025).
- /Max Roser, »CO₂ emissions«. Published online at OurWorldinData.org, 2020: <https://ourworldindata.org/co2-emissions> (Zugriff: 05.04.2025).
- Will Steffen u.a., PNAS 2018; 115:33:8252–8259, ©2018 by National Academy of Sciences.
- Ning Zeng u.a., 3775-year-old wood burial supports »wood vaulting« as a durable carbon removal method, in: *Science*, 26 Sep 2024, Vol. 385, Issue 6716, 1454–1459 DOI:10.1126/science.adm8133 (Zugriff: 05.04.2025).

