



Zur Verantwortung von Natur- und Technikwissenschaftlern und zum Klimaproblem

Werner Ebeling und Lutz-Günther Fleischer

Berlin, MLS

Veröffentlicht: 2. September 2022

Abstract

This paper continues the discussion started at Leibniz Day 2022 on the responsibility of scientists from the perspective of a physicist and an interdisciplinary natural and technical scientist. It is assumed that energy can neither be created nor destroyed, but that the various forms of energy can be converted into each other, that energies (generic term) can be accumulated on different practicable energy carriers. In the spirit of theodicy, there are thus various effective and so far, insufficiently used measures from a natural science and technology perspective to decisively improve the climate-relevant balances.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird die auf dem Leibniz-Tag 2022 begonnene Diskussion um die Verantwortung von Wissenschaftlern aus der Sicht eines Physikers und eines interdisziplinär arbeitenden Natur- und Technikwissenschaftlers fortgesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass Energie weder erschaffen noch vernichtet werden kann, wohl aber die vielfältigen Energieformen ineinander umwandelbar, Energien (Oberbegriff) auf verschiedenen praktikablen Energieträgern akkumulierbar sind. Im Sinne der Theodizee gibt es demgemäß aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht verschiedene effektive und bisher unzureichend genutzte Maßnahmen, um die klimarelevanten Bilanzen entscheidend zu verbessern.

Keywords/Schlüsselwörter

responsibility, energy, entropy, carbon dioxide, thermodynamics of irreversible processes
Verantwortung, Energie, Entropie, Kohlendioxid, Thermodynamik irreversibler Prozesse

Auf dem Leibniz-Tag 2022 war das Referat der Präsidentin der Leibniz-Sozietät Gerda Haßler der leibnizschen Theodizee und der Verantwortung von Wissenschaftlern für eine bessere Welt gewidmet. Die hier vorgelegten Überlegungen sind aus der Diskussion dazu entstanden (Ebeling/Fleischer 2022).

Bekanntlich hat Leibniz mit seiner Theodizee einen Rahmen für die Diskussion der Verantwortung der Wissenschaften für eine bessere Welt gegeben. Die Wahrnehmung dieser Verantwortung ist sicher spezifisch für die einzelnen Wissenschaftszweige, aber für alle Wissenschaften fundamental.

Leibniz unterschied drei Klassen des Übels: *malum morale* (das moralische Übel), *malum physicum* (das physikalische Übel) und das *malum metaphysicum* (das metaphysische Übel). Wir diskutieren hier nur das *malum physicum* aus der Sicht eines Physikers und eines interdisziplinär arbeitenden Natur- und Technikwissenschaftlers. Wir sehen bei einer Entdeckung oder Erfindung die Verantwortung der Wissenschaftler primär darin, die absehbaren Folgen verschiedener Anwendungen (aber auch der bewussten Nichtnutzung des Möglichen) zu diskutieren und abzuwägen. Hinsichtlich drängender globaler Fragen, wie dem essentiellen Klimawandel, bedeutet das, möglichst effiziente Maßnahmen aus einem komplexen

Möglichkeitsfeld zu erkunden und gegeneinander abzuwägen. Entscheidungen darüber sind dann wesensgemäß gesamtgesellschaftliche Aufgaben und Gegenstand einer nachhaltigen Politik. Nachdem in der Mitte des 20. Jahrhundert die Energie der Kernspaltung eine erste militärische Nutzung fand, ist sehr viel dazu gesagt worden. Das führte bis zur Behauptung, dass die Hauptverantwortung für Hiroshima und Nagasaki bei Einstein, Hahn und Meitner läge. Das geht zu weit und negiert historische Sachverhalte. Die Frage nach der Rolle von Kernkraftwerken für eine CO₂-arme Energiewirtschaft scheint dagegen international gesehen, offen zu sein. Das betrifft insbesondere die Nutzung der Kernfusion, einer noch im Erprobungsstadium befindlichen Technologie, die den Mechanismus der Fusionsprozesse in der Sonne in einem irdischen Kraftwerk simulieren soll und die eine Technologie der Zukunft sein könnte.

Man hört häufig im Funk, sieht im Fernsehen und liest in der Presse: „Die Wissenschaft sagt, oder die Wissenschaft ist sich einig“. Da handelt es sich jedoch um ein Missverständnis über das Wesen der Wissenschaft. Wissenschaft entsteht in der Diskussion und im schöpferischen Streit mit Argumenten. Das Richtige setzt sich häufig erst in einem längeren Findungsprozess durch, es kann nicht durch Abstimmung gefunden werden. Wer Wissenschaft ernst nehmen will, darf ihre Vielstimmigkeit und das immanente Austragen von Meinungsverschiedenheiten nicht ignorieren.

Das revolutionäre astronomische Modell des Kopernikus fand unter Fachgenossen anfangs nur wenige Anhänger und Galilei, der sich dafür einsetzte, wurde hart bestraft. Hätte man im ersten Jahrzehnt nach Einsteins neuen Theorien darüber abgestimmt, hätten sie keine Mehrheit bekommen. Wissenschaft ist immer ein Spektrum von Meinungen und „die Wissenschaft“ gibt es nicht, sie entwickelt sich ständig weiter. Wissenschaft ist ein vielfältiges Spektrum von Thesen und Gegenthesen, in der sich das Richtige langsam durchsetzt. Als Prozess stellt sich die Wissenschaft neben neuen Problemen fortgesetzt verallgemeinernde und vertiefende Fragen, Wissenschaft prüft mit verbesserten experimentellen Methoden und Instrumentarien, mit modellgestützten Simulationen sowie theoretischen Ansätzen und präzisiert ihre stets zeitweiligen Antworten.

Eine besondere Herausforderung für die heutige Wissenschaft ist ohne Zweifel das Problem der nichtlinearen Entwicklung des Weltklimas und die Erforschung besonders effektiver Maßnahmen, um einen weiteren Anstieg der Temperatur und der CO₂-Emissionen zu vermeiden.

Zur Anatomie und Genese der gefährlichen, möglicherweise katastrophalen Veränderungen des Klimas und der Umwelt haben wir einige Überlegungen angestellt und uns als Leibnizianer gefragt: Was wäre den großen Denkern in der leibnizischen Akademie, wie Helmholtz, Clausius, Nernst, Hertz, Einstein und Prigogine zur Klimakrise eingefallen? Unsere Vordenker hätten empfohlen, grundsätzlich heranzugehen und insbesondere die entscheidenden Bilanzen der physikalischen Grundgrößen wie Energie, Entropie und Stoffmengen zu prüfen. Sie sahen sich dem Grundsatz verpflichtet, in erster Linie die Naturgesetze zu respektieren. Der erste Hauptsatz der allgemeingültigen Physik besagt, dass Energie weder erschaffen noch vernichtet werden kann. In Bezug auf das Klima heißt das, die von der Sonne an der Erdoberfläche empfangene Strahlungsenergie von etwa 230 Watt pro Quadratmeter ist die entscheidende energetische Determinante der Erde, auf der wir leben. Mehr kann prinzipiell nicht genutzt werden. Die ebenso wichtige Entropiebilanz, die aus der Temperaturdifferenz zwischen Erde und Weltraum resultiert, weist für den Entropieexport den Betrag von 1 Watt pro Quadratmeter und Kelvin aus. Das entspricht einem ständigen Export von Entropie. Die Produktion von Entropie auf unserem Planeten darf im Durchschnitt den Betrag von 230 Watt/Kelvin pro Quadratmeter nicht übersteigen, anderenfalls wachsen Unordnung und Chaos über alle Maße. Zum besseren Verständnis: *Entropieproduktion* bedeutet

in jedem Fall die Entwertung wertvoller (freier, arbeitsfähiger) Energien, Exergieverlust, besonders die Umwandlung elektromagnetischer Strahlung, Elektroenergie, mechanischer Energie in Wärme oder der chemischen Energien bei Bränden und Explosionen in mechanische Energie und letztlich wiederum in Wärme. Unser Planet erwärmt sich folgeschwer, wenn die natürlichen und anthropogenen Prozesse, die von der Sonneneinstrahlung gegebenen naturgesetzlichen Grenzen überschreiten. Diese entscheidende Bilanz droht seit dem vergangenen Jahrhundert zu entgleisen. Die Sicherung und der Erhalt jener Vielzahl und Vielfalt, essentieller, teils interagierender oder gar gekoppelter, *dynamischer Gleichgewichte* im kompartimentierten Erdsystem bedarf *obligatorisch* der ständigen mengenäquivalenten Kompensation der *Entropieproduktion*. Diese ist die naturgesetzliche Folge irreversibler (natürlicher) Prozesse und intensivierter, sich zudem ausdehnender Aktivitäten der Menschen sowie ressourcenaufwändiger Lebens- und Entwicklungsbedingungen. Die Regelung des bilanzierten Systems, durch die Entropieproduktion ausgeglichen wird, erfolgt über den *Entropieexport* und/oder die *Zufuhr freier Energie/Enthalpie* (negativer Entropie – bzw. in sprachlicher Kurzform: Negentropie). Beide etablierten Begriffe sind u.U. verwirrend, eigentlich überflüssig.

Ludwig Boltzmann, der die *statistischen Methoden und Deutungen* in die Physik einführte, damit wesentliche Grundlagen für die sich herausbildende Mikrophysik schuf und für den zweiten Hauptsatz eine allgemeiner gültige *statistische Entropie* definierte, erklärte schon 1886:

„Der allgemeine Lebenskampf der Lebewesen ist daher nicht ein Kampf um die Grundstoffe – auch nicht um Energie, welche in Form von Wärme, leider unverwandelbar, in jedem Körper reichlich vorhanden ist, sondern ein *Kampf um die Entropie*, welche durch den Übergang der Energie von der heißen Sonne zur kalten Erde disponibel wird [...], ehe sie auf das Temperaturniveau der Erdoberfläche herabsinkt“ (Boltzmann 1976 [1886]: 338).¹

Eine ausführlichere Darstellung der dabei ablaufenden irreversiblen Prozesse mit dem Entropieexport bzw. der Zufuhr freier Enthalpie sowie der darauf basierenden Selbstorganisation in lebenden Systemen, offerieren Ebeling und Feistel (Feistel/Ebeling 2011: 63–76). Die faktisch einzige, zudem außerordentlich ergiebige natürliche Quelle für den Entropieexport, der unserer Erde und damit den lebenden Systemen (mit ihren selbstorganisierenden Ordnungen) zur Verfügung steht, sind die *Lichtquanten der primären Solarstrahlung*. Sinnvollerweise fußt darauf auch die Energiewende bei der konsequenten Substitution der fossilen Energien, jener sich erschöpfenden Quelle, einer Ressource.

Die beachtenswerten Stoffbilanzen der Erde sind fast ausgeglichen, d.h. die chemischen Elemente sind bis auf einen ganz kleinen, häufig wechselseitigen Transfer mit dem Weltraum in nahezu konstanter Menge vorhanden und können nur in andere chemische Verbindungen umgewandelt werden. Die neutralen Stoffbilanzen, die Energie- und Entropiebilanzen (oder in Einem, die Exergiebilanzen, d.h. der in Bezug auf die Umgebungstemperatur arbeitsfähigen Energie) sind die physikalischen und letztlich *entscheidenden Determinanten der Evolution unseres Planeten*. Für die Klimaentwicklung sind vor allem die Bilanzen der Stoffflüsse von Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff wichtig. Diese Stoffe wurden in der Erdgeschichte zwischen der Atmosphäre und der Kruste hin- und her transferiert und immer wieder umgeformt. Vor Jahrmilliarden waren vorwiegend Wasserstoff in freier Form und als Wasserdampf sowie Sauerstoff und Kohlenstoff als CO₂ gebunden in einer reduzierenden Atmosphäre vorhanden. Es gab also schon einmal ein CO₂-Problem. Dann erst „erfand“ die Evolution primitive Lebewesen und später die Pflanzen, welche die Photosynthese beherrschten,

¹ Originalzitat Ludwig Boltzmanns in der von Engelbert Broda – nach erhaltenen Schriften Boltzmanns – als Kurzfassung entworfenen Rekonstruktion seines verschollenen Vortrags mit dem wiedergegebenen Titel zur Jahreshauptversammlung der Philosophischen Gesellschaft am 28. Oktober 1905 in Wien.

die mit Hilfe des Sonnenlichtes CO₂ spalten konnten. Die Photosynthese der Pflanzen war von zentraler Bedeutung für die Evolution und hat über Jahrmilliarden hinweg die heutigen Bedingungen und insbesondere die heutige Atmosphäre mit freiem Sauerstoff, freiem Stickstoff und einem kleineren Anteil von CO₂ geschaffen. Der entstehende Kohlenstoff wurde zum Teil in riesigen Lagerstätten von Kohle und Kohlewasserstoffen in der Erdrinde geparkt und von der modernen Industrie unverantwortlich stark ausgebeutet. Ein geringerer Teil verblieb als CO₂ in der Atmosphäre oder wurde in den Ozeanen gelöst. Der CO₂-Anteil in der Atmosphäre ist erst im industriellen Zeitalter wieder messbar angewachsen und gefährdet heute – wegen seiner Kopplung mit der Temperaturentwicklung – das globale Klima, die Existenz und Lebensweise der Menschheit.

Das 1,5-Grad-Ziel zur Begrenzung des folgenschweren Klimawandels ist ein markanter Aspekt der zumindest verlaublichen weltweiten Gefahren-Abwehr. Mit noch größerer Besorgnis beobachten Erdsystem- und Resilienzforscher aber die – von der Allgemeinheit kaum reflektierten – so genannten *Kipppunkte*. Die nach deren Überschreiten im komplexen Klimasystem ausgelösten plötzlichen irreversiblen Veränderungen würden möglicherweise zu Kettenreaktionen im Erdsystem führen.

Der Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK), Johan Rockström, warnt vor einem möglichen Kontrollverlust (Rockström 2021). Wir sollten daher mit geschärftem Verantwortungsbewusstsein die Nettobilanzen des irreversiblen Wandels optimieren, dabei die Tatsache beachten, dass die ökonomische Basis mit der ökologischen interferiert.

Diese Skizze verdeutlicht, dass die Klimaentwicklung aus naturwissenschaftlicher Sicht primär ein Problem der thermodynamischen Flüsse, d.h. der Energie-, Entropie- und Stoffbilanzen ist. Es handelt sich genauer gesagt, um Probleme der Thermodynamik irreversibler Prozesse (TIP). Da beide Verfasser einen Background in dieser Wissenschaft haben, erlauben wir uns (ohne Anspruch auf Vollständigkeit und mit der vornehmlichen Aufforderung zur kollegialen Ergänzung) einige Gedanken aus den dynamischen Flussbilanzen abzuleiten.

Eines der ersten Modelle der Flussbilanzen von Kohlendioxid in der Atmosphäre stammt vom schwedischen Chemiker Svante Arrhenius (1857–1928), der wissenschaftlich eng mit der Berliner Akademie assoziiert war. Bereits 1896 beschrieb Arrhenius in einer Arbeit, dass ein steigender Gehalt an CO₂ die Temperatur der Erdoberfläche deutlich erhöhen würde. Mit seinen Untersuchungen der Folgen einer anthropogenen Zunahme des Kohlendioxids in der Atmosphäre und über den Treibhauseffekt auf das Klima, hat Arrhenius heutige Resultate des IPCC tendenziell vorausgesagt. Ein genaueres Klimamodell, das auch schon auf Flussbilanzen gegründet war, stammte von unserem Akademie-Mitglied Heinrich Hertz (1854–1897). Aus der Sicht der TIP ist die Klimaentwicklung ein Input – Output – Problem mit Ein- und Ausströmen von Strahlungsenergie sowie den Ein- und Ausflüssen der Stoffe, insbesondere von Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff, zwischen den oberflächennahen Schichten unseres Planeten. Naturgemäß steigt die CO₂ Menge, wenn mehr freies CO₂ produziert als gebunden wird. Die Temperaturentwicklung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit ursächlich damit korreliert. Die Uratmosphäre bestand in der frühen Erdgeschichte zu etwa 90 Prozent aus Wasserdampf und CO₂, freier Sauerstoff war nicht vorhanden. In den folgenden Jahrmilliarden wurde das Kohlendioxid teilweise als Kalkstein gebunden; und nach dem Generieren der Photosynthese durch die Pflanzen unter Freisetzung von Sauerstoff in Form von Holz und schließlich Lagerstätten von Kohle, Erdöl und Erdgas gebunden. Die Stoffbilanz wurde zugunsten von in der Erdrinde gebundenem Kohlenstoff und freiem Sauerstoff in der Atmosphäre verschoben.

Von diesen unbestrittenen erdhistorischen Fakten ausgehend, halten wir es für Erfolg verheißend, die kooperativen Anstrengungen nicht einseitig gewichtet auf die Verringerung

von CO₂-Emissionen z.B. über regulative Sparmaßnahmen, sondern nach dem Vorbild der Erdgeschichte mindestens ebenso intensiv auf die Erhöhung von CO₂-Fixierungen zu richten. Das bedeutet, die Forschung auf Grundstoff-Synthesen mit CO₂-Reaktanden sowie industrielle CO₂-Kreisläufe zu orientieren, die CO₂ langfristig binden. In Einem heißt das, *den scheinbaren Schadstoff CO₂ zu einem innovativen Rohstoff zu transferieren*. Als Beispiel soll ein neues Milliardenprojekt dienen, das deutsch-norwegische Wasserstoffprojekt H2GE Rostock. Der deutsche Gaskonzern VNG plant in Kooperation mit dem norwegischen Equinor den Bau und Betrieb einer Anlage mit einer Zielleistung von 1,3 Gigawatt in Rostock mit einer jährlichen Wasserstoff-Produktionskapazität von bis zu 230.000 Tonnen, was etwa 20 % des aktuellen Wasserstoffmarktes in Deutschland entspräche. Gemeinsam mit dem Energieunternehmen Equinor soll Erdgas aus Norwegen durch bestehende Leitungen nach Rostock gebracht und unter Nutzung der Elektroenergie der Windparks an der Ostseeküste dort weiterverarbeitet werden. Bei dem angestrebten Verfahren wird Erdgas in Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff gespalten. Bis zu 230.000 Tonnen „blauer Wasserstoff“ pro Jahr sollen von der deutschen Industrie genutzt werden und etwa 20% des Bedarfs liefern. Das CO₂ soll verflüssigt im Meeresboden bei Norwegen gebunden werden. Soweit der Plan, der nun vor einem Canossa-Gang durch behördliche Genehmigungen steht, aber eine perspektivreiche Richtung zeigt. Aus thermodynamischer Sicht ist das Projekt sinnvoll und realisierbar. Dazu zeigen wir das Phasendiagramm von CO₂ aus dem wichtige thermodynamische Informationen hervorgehen:

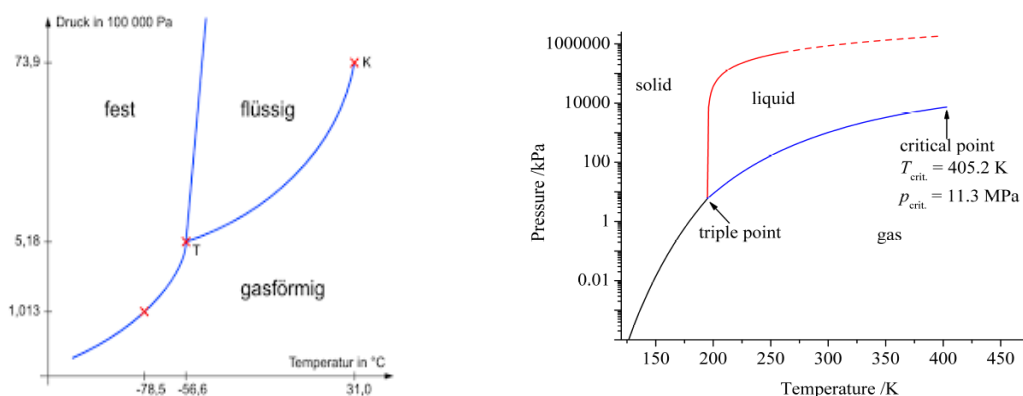


Abb. 1 Phasendiagramme von Kohlendioxid (links) und Ammoniak (rechts).

Wie das Phasendiagramm zeigt, liegt der Tripelpunkt von CO₂ bei etwa minus 56 Grad Celsius und 74 bar; und es gibt auch bei normalen Meerestemperaturen unter hohem Druck einen weiten Bereich, in dem CO₂ in flüssiger Form vorliegt. Da der Wasserdruck pro 10 m Tiefe um etwa 1 bar zunimmt, müsste das flüssige CO₂ in einer Tiefe von mehreren 100 Metern im Ozean gelagert werden. Das ist zwar schwierig, stellt aber heutzutage kein unlösbares technisches Problem dar. Man kann nur hoffen, dass solche innovativen Lösungen ebenso große Aufmerksamkeit finden wie die teuren, und teilweise aufwendigen Maßnahmen zur Verringerung von Emissionen.

Wir haben hiermit nur ein gewiss interessantes und realisierbares Projekt aufgezeigt. Am Ende zählt nur das Resultat. Die Lösung, die die Evolution der Erde vor Millionen von Jahren fand, war ein maßgeblicher Schlüssel auf dem Weg zum heutigen Leben. Allgemeinere und gewiss ergänzungsbedürftige richtungswisende Verfahren für das Binden von CO₂ und die Verringerung von Emissionen sind aus unserer Sicht:

1. Ausbau der Wald-, Grün- und Moorflächen, strikte internationale Verbote großflächiger Rodungen von Wald und – besonders wichtig: Importbeschränkungen für Holz, Soja, usw. aus Rodungsgebieten durch internationale Vereinbarungen. Es sollten wirksame ökonomische Anreize für klimaoptimierte Anpflanzungen (widerstandsfähigere Wälder, Biodiversitätsförderung) und nicht für Rodungen geschaffen werden. Die in jüngster Zeit geförderten Moorflächen können dann einen gewichtigen Beitrag zur Kohlenstoffbilanz leisten, wenn die Torfnutzung nicht, wie mitunter verlangt, eingeschränkt, sondern besser ausgebaut wird.
2. Diversifizierung der Bindungstechnologien von CO₂ aus der Energietechnik mittels der Vielfalt von Sorption-Prozessen und Reaktionen, wie der Fixierung von CO₂ in synthetischen Kraftstoffen (*bio fuel*) und anderen stofflichen Nutzungen von CO₂ in der Industrie. Aus dieser Sicht bietet die Synthese von Kohlenwasserstoffen als Kraftstoff gegenüber der direkten Nutzung von grünem Wasserstoff einige Vorteile, weil der Kohlenstoff damit eine gewisse Zeit stabil gebunden wird.
3. Entwicklung und Einführung neuer Technologien in der Bauwirtschaft und anderen Technologiefeldern. Man darf darunter nicht nur die Dämmsysteme verstehen, die die Transmission der ambivalenten Wärme herabsetzen, sondern auch primäre Technologien, die generell die CO₂-Bilanz verbessern. Beispielweise werden beim Kalkbrennen für die Baustoff- und Hüttentechnologie noch immer große Mengen CO₂ freigesetzt. Zur Verbesserung der CO₂-Bilanz führt ein verstärkter Einsatz von Kunststoffen, die aus Erdöl gewonnen werden und Kohlenstoff binden, sowie deren Recycling z.B. über kalte Plasmen. Eine besonders effektive Methode, um Kohlenstoff der Atmosphäre zu entnehmen und langfristig zu binden, ist die stärkere Verwendung von Holz als Baustoff und Stroh als Dämmstoff. Holz und Stroh, die schon unsere unmittelbaren Vorfahren intensiv beim Hausbau eingesetzt haben, fixieren CO₂ sehr langfristig.
Schließlich bedarf es der zeit- und problemgerechten Realisierung der schon ausgiebig erörterten Ziele der hochkomplexen Energiewende 2.0. als *soziotechnische Transformation*. Deziert gehören bestmögliche Energiewandlungen, der rationelle Energieeinsatz und das Erschließen von Energiesparpotentialen dazu.
4. Direktes Fixieren von CO₂ in der Erdrinde oder in den Ozeanen, etwa mit der Einlagerung von CO₂-Emissionen aus Kraftwerken in tiefen Gesteinsschichten, oder wie oben beschrieben, unter dem lokalen Druck in der Tiefsee. Diese Technologien sind in Deutschland gesetzlich erlaubt, werden allerdings von deutschen Medien noch kritisch gesehen. Dabei wird leider eher ideologisch als naturwissenschaftlich argumentiert.

Jede Volkswirtschaft sollte jährlich eine möglichst exakte Kohlenstoffbilanz² und nicht nur die Emissionsbilanz ausweisen. Wir wiederholen, dass nur die Gesamtbilanz zählt und dass es ganzheitlicher Sichten auf die Probleme sowie holistischer Problemlösungs-Strategien bedarf. Als größtes Risiko für das natürliche Kohlenstoffgleichgewicht betrachten

² Wissenschaftler des Deep Carbon Observatory (DCO), dem mehr als 1200 Forschende aus 55 Ländern angehören, haben nach zehnjähriger Forschungsdauer im Oktober 2019 *erstmalig* bekannt gemacht, wie viel Kohlenstoff C in den Reservoirs der Erde vorliegt. Die Gesamtmenge des relativ seltenen Elements C beträgt demnach 1,85 Milliarden Gigatonnen (Gt). 99,9 % sind unterhalb der Erdoberfläche in tiefen Schichten gebunden. Von den oberflächennahen 43.500 Gt C enthält die Tiefsee 37.000 Gt C. Deren CO₂-Senke ist trotz der steigenden Emissionen noch intakt. Die Atmosphäre ist mit nur 590 Gt – allerdings als CO₂ und CH₄ außerordentlich klimarelevantem – Kohlenstoff beteiligt. Der zwischen den Kohlenstoffreservoirs funktionierende bidirektionale Transfer und die Photosynthese verändern die in der Studie ermittelte Verteilung ständig (<https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/geologie/erstmalig-vollstaendige-kohlenstoffbilanz-der-erde-erstellt-1337340>).

dazu forschende Wissenschaftler die CO₂-Emissionen des Menschen, der in den vergangenen 100 Jahren infolge der Nutzung fossiler Brennstoffe 40 bis 100 Mal mehr Kohlenstoff emittiert hat als alle natürlichen Prozesse der Erde. Das Binden von Kohlenstoff in der Erdkruste und im Meerwasser funktionierte Jahrmilliarden und bot die entscheidende Grundlage für fast alle Funktionalitäten und jene sie tragenden Strukturen unserer heutigen Welt.

5. Auch die Weiterentwicklung der Klima-Theorie muss erwähnt werden; ihre vordringliche Aufgabe besteht darin, die bestehenden Klimamodelle auf ein Niveau zu heben, in dem die beobachteten Trends nicht länger im Unsicherheitsbereich der Modelle liegen. Dann könnte auch die Auswirkung technischer Maßnahmen auf die globalen Systeme Lithosphäre, Hydrosphäre, Erdatmosphäre und Biosphäre – insbesondere jedoch auf das Klima – darunter auch die Wirkung der angeführten Ansätze zuverlässiger quantitativ bewertet werden.
6. Die Produktion, der Einsatz und Export von Explosivbomben und -granaten sollte international geächtet werden. Fast jede hergestellte Bombe oder Granate kommt irgendwann zur Explosion, produziert Wärme und führt über eine Druckwelle zu großen Zerstörungen sowie zur Energiedissipation. Auch wenn das noch so fern im Ausland oder bei der Entsorgung passiert, wird unser Klima zerstört. Detonationen sind Klimakiller, unabhängig davon, wo und wann die Bomben und Granaten auf der Erde gezündet werden. Sie erzeugen eine gewaltige Menge CO₂ und was noch erschwerender ist, sie erzeugen durch Zerstörung von Bauwerken enorme Mengen von Entropie. Als verheerendster CO₂- sowie Entropie-Produzent und Klimakiller sollten die Herstellung und der Verkauf von Bomben und Granaten verboten werden, dagegen ist die Nutzung kleinkalibriger Waffen weniger relevant für die Klimaentwicklung. Die 5 großen Kriege des 21. Jahrhunderts haben unserem Klima infolge von Detonationen und Zerstörungen riesigen Ausmaßes fast einen Todesstoß versetzt. Allein in den Kriegen im Irak und in Libyen gab es über 50.000 Lufteinsätze mit Explosivwaffen. Auch im verheerenden Ukraine-Krieg wird eine enorme Menge von Bomben- und Granaten-Einsätzen registriert. Genaue Zahlen liegen nicht vor, es sind aber gewiss zigtausende Sprengkörper.

Zu einer den wichtigsten aktuellen Fragen gehört, auf welche Träger sich der Transport hochwertiger Energie mit zukünftigen Technologien orientieren sollte. Dazu wollen wir noch einige Überlegungen anführen. Heute wird häufig verkündet, dass Wasserstoff der ideale Energieträger sei, da seine Verbrennung nur Wasser erzeugt und somit ohne schädliche Emissionen bleibt. Auch diese Frage sollte im Gesamtzusammenhang gezielter diskutiert werden. Die Herstellung von Wasserstoff ist noch immer teuer und in toto nicht unbedingt umweltfreundlich.

Man darf zudem einen wesentlichen Nachteil des Wasserstoffs nicht unterschätzen: Sein Gebrauch ist mit Sicherheitsproblemen verbunden. Wasserstoff ist zündfreudig, extrem flüchtig, schwierig einzulagern und zu befördern. Ab bestimmten Mischungsverhältnissen mit Luft ist er hoch explosiv. Luft und Sauerstoff müssen daher aus Wasserstoffanlagen herausgehalten werden. Diese Eigenschaften stellen besondere Anforderungen an die Sicherheitstechnik. Das dürfte eine Nutzung als Reinstoff z.B. in normalen Haushalten wohl noch lange Zeit ausschließen. Schon der Transport von reinem Wasserstoff durch Pipelines könnte ein gewisses Risiko für Ansiedlungen in der Umgebung darstellen. Es liegt aus diesen Gründen nahe, den Wasserstoff für den Transport vom Erzeuger zum Nutzer in einer stabilen chemischen Struktur zu binden. Dafür sind mehrere Varianten in der Diskussion und in der praktischen Erprobung. Erst einmal bieten sich bewährte Technologien, wie die Nutzung von Propan C₃H₈ oder ähnlichen Kohlenwasserstoffen an, weil eine erprobte Technik der Nutzung von Propan für Antriebs- und Heizungszwecke bereitsteht. Damit würden die

erheblichen Kosten für die Entwicklung neuer Technologien wegfallen, allerdings bleibt das Problem ungelöst, wie das bei der energetischen Nutzung entstehende CO₂ gebunden und eingelagert werden kann. In der jüngeren Vergangenheit wird eine neue Technologie intensiv erforscht: die *Ammonium–Energetik*. Wir wissen, dass unser Mitglied Fritz Haber seit 1904 die katalytische Bindung von Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak erforschte, gemeinsam mit Bosch das Haber-Bosch-Verfahren entwickelte und für diese bedeutsame Erfindung mit dem Nobelpreis des Jahres 1918 ausgezeichnet wurde. Einige Autoren geben an, dass flüssiges Ammoniak mit 22,5 MJ/L eine Energiedichte hat, welche die von flüssigem Wasserstoff mit 8.5 MJ/L und komprimiertem Wasserstoffgas mit etwa 4.5 MJ/L deutlich übersteigt. Weniger günstig fällt eine realistische energetische Gesamtbilanz aus. Bei der Verbrennung von Ammoniak entstehen nur Stickstoff und Wasser. Für die Herstellung von 1 kg Ammoniak werden etwa 0,6 kg Methan oder rund 30 MJ \approx 8,3 kWh benötigt. Der Heizwert von Ammoniak beträgt 5,2 kWh/kg. Was einer Effizienz für die Herstellung von 63% entspricht. Nach dieser Abschätzung ist der Heizwert von flüssigem NH₃ nur etwa halb so hoch wie der von Benzin oder Diesel und etwa ein Sechstel so groß wie jener von flüssigem Wasserstoff. Von Vorteil erweist sich, dass diese Technologie altbewährt ist. Ammoniak wurde schon 1872 als Antrieb für Straßenbahnen in New Orleans verwendet. Auch die Autoindustrie experimentierte schon mit Ammoniak. In den 40er Jahren fuhren belgische Busse mit Ammoniak; und 1981 wurde in den USA ein Chevrolet Impala mit Ammoniak betrieben. Bei dieser Nutzung wird in der Regel flüssiges Ammoniak verwendet. Das Phasendiagramm in Abb. 1 zeigt, dass es zwischen 200 K und 300 K einen weiten Druckbereich gibt, in dem Ammoniak in flüssiger Phase vorliegt und gut transportiert werden kann. Bei einem Druck von 9 bar lässt es sich schon bei 20°C verflüssigen. Allerdings ist Ammoniak ätzend und giftig, aber warnfähig. Menschen riechen Ammoniak bereits in geringsten, ungefährlichen Konzentrationen. Ammoniak lässt sich auch gut in Brennstoffzellen herstellen und nutzen: Dabei wird an der mit einem Katalysator beschichteten Anode Wasser in Sauerstoff, H⁺-Ionen und Elektronen zerlegt. Die Protonen diffundieren durch einen Elektrolyten und eine Membran zur Kathode. Die Elektronen erreichen diese über eine Draht-Verbindung. An der Kathode werden Stickstoff-Moleküle mit Hilfe eines Katalysators in N-Atome aufgespalten, die dann mit den Protonen und Elektronen zu NH₃ reagieren können. Diese Eigenschaften und die Tatsache, dass bei einer Verbrennung nur Wasser und Stickstoff entsteht, macht Ammoniak zu einem erstrangigen Kandidaten für eine CO₂-freie Energiewirtschaft. Es gibt bereits erste erfolgreiche Einsätze in emissionsfreien Brennstoffzellen sowie Turbinen und erste praktische Anwendungen für Kraftwerke sowie Schiffsmaschinen. Das flüssige Ammoniak kann in einer Turbine verbrannt oder in einer NH₃-Brennstoffzelle zur Netzstabilisierung in elektrische Energie umgewandelt werden. Das ist zumindest ein perspektivreicher Weg in eine zukünftige CO₂-freie Energiewirtschaft, wenn auch einige technisch-technologische Probleme der Ammonium–Energetik noch offen sind.

Insbesondere die effiziente Gewinnung von Ammoniak als Gas sowie seine Nutzung und energetische Verwertung in einer Brennstoffzelle erfordern die Entwicklung adaptierter und spezieller neuer *Technologien*. Dabei verstehen wir unter Technologie generell sowohl die reale Lösung im komplexen prozessualen Zusammenwirken von Menschen, der Technik und dem Arbeitsgegenstand, als auch ein leistungsstarkes Methoden-Arsenal zum bestmöglichen Erreichen eines vorgegebenen Ziels in einem definierten Anwendungsbereich. In der Gegenwart werden in deutlich wachsendem Maße selbst komplexe Erkenntnis-, Design- sowie Entwicklungsprozesse in ihrem phänomenologischen Reichtum technologisch adaptiert und wirksam (vgl. Fleischer 2015: 35–67). Das zu diesem Zweck zwingend einzubeziehende, systematisch begründete Nachhaltigkeitsdenken anerkennt und nützt bewusst die Tatsache, dass erst hoch entwickelte (naturwissenschaftliche und soziale) Technologien qualifizierte

Nachhaltigkeitskonzepte ermöglichen und fundieren. Die humane Zukunftsgestaltung, die Existenz und Wohlfahrt der Gattung Mensch implizieren die Förderung, Pflege, den Einsatz und die kritische Begleitung derartiger Technologien. Dass ein würdiges Weiterleben der Menschen überhaupt möglich bleibt, beansprucht bei der Wahrnehmung von Verantwortung die höchste Priorität. Die Vielzahl und Vielfalt der Dimensionen individueller und kollektiver Verantwortung erreicht mit der Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse (aber auch bei deren bewusster Leugnung) das Wirkungsfeld ethisch und moralisch relevanter Kategorien.

Soweit einige, vom Apell der Präsidentin der Leibniz-Sozietät inspirierte Überlegungen, die Verantwortung für eine bessere Welt ins Zentrum unserer wissenschaftlichen Arbeit zu stellen. Wir wissen, dass eine tragfähige Beurteilung der Entwicklungen und die effiziente Einflussnahme darauf kaum als einzelner Wissenschaftler möglich ist und vertreten die Auffassung, dass nur interdisziplinäre Teams aus relevanten Wissenschaftsgebieten, die ohne Vorurteile herangehen, dazu in der Lage sind.

Zusammenfassend vermerken wir: Im Sinne der Theodizee gibt es aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht verschiedene effektive und bisher unzureichend genutzte Maßnahmen, um die klimarelevanten Bilanzen entscheidend zu verbessern. Auf eine Verbotsliste gehört die großflächige Rodung von Wäldern, der Einsatz von Elektroenergie zur direkten Wärmeerzeugung und eine Wegwerf-Wirtschaft.

Die Herstellung und der Einsatz von Bomben und Granaten, sowie deren gewinnträchtiger Export bleibt wohl die größte ‚Sünde‘ wider die Leibniz’sche Theodizee – mit der inhärenten Idee der Schaffung einer besseren Welt. Als Realisten wissen wir, damit ein Ideal aufzurufen, dem man sich nur asymptotisch nähern kann. Aber wir sind viel zu weit von diesem hohen Ziel entfernt, als den Zustand und dessen Polarisierungen in der Gegenwart akzeptieren zu können.

Zur Klarstellung sei betont, die angeführten Naturgesetze, insbesondere die beiden skizzierten Hauptsätze und die Bilanzgleichungen der Thermodynamik irreversibler Prozesse, heben hervor, ‚was nicht geht‘; sie offerieren aber auch ein potentes Möglichkeitsfeld. Insbesondere zeigen sie, dass ein zuträgliches Klima nicht zu erreichen ist, ohne die rezenten Bilanzen von wertvoller (d.h. arbeitsfähiger) Energie, Entropie und Kohlenstoff in kürzesten Fristen zielgerichtet zu verbessern und dabei die Kapazitäten der verschachtelten globalen Erdsphären exakt zu berücksichtigen. Das erweist sich als „*conditio sine qua non*“.

Wir unterstreichen im Resümee zudem die fundamentale Bedeutung *ganzheitlicher Betrachtungs-, Denk- und Handlungsweisen* sowie korrekter *stofflicher, energetischer* und *informationeller Gesamtbilanzen* sowie deren Verflechtungen. Selbst eine positive Maßnahme, wie das Absenken der Temperatur in Wohnräumen, wirkt kontraproduktiv, wenn in deren Folge verstärkt der Klimakiller Elektroheizung genutzt wird. Auch striktes Sparen nützt wenig, wenn funktionsfähige Geräte im Müll landen, nur weil sie nicht topmodern sind.

Wann und wie wissenschaftlich begründete Empfehlungen im Einzelnen umgesetzt werden, ist eine gesamtgesellschaftliche Entscheidung mit einer exponierten Verantwortung der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, der wir uns gemeinsam zu stellen haben.

Gern nehmen wir dazu eine – auch uns verpflichtende – gedankliche Anleihe vom Credo des Physikers und Akademiemitglieds Max Steenbeck (1904–1981) auf:

„Sich einer Verantwortung zu stellen heißt immer, ein Geschehen, von dem man etwas versteht, nicht einfach dem Selbstlauf — oder Zufall oder nur anderen Menschen — zu überlassen, sondern mitzuwirken oder doch wenigstens zu versuchen, dass es in richtiger Weise weiter abläuft. Das verlangt allerdings ein Kennen — und Anerkennen — einer über das Fachspezifische hinausreichenden Werteskala für das was werden soll.“ (Steenbeck 1978: 79)

„Doch sage niemand, so etwas könnten nur die ganz Großen tun“ (Steenbeck 1978: 82).

Bibliographie

- Boltzmann, Ludwig (1976 [1886]): „Erklärung des Entropiesatzes und der Liebe aus den Prinzipien der Wahrscheinlichkeitsrechnung“. *Physikalische Blätter* 32/8, 337–341.
- Ebeling, Werner/Fleischer, Lutz-Günther (2022): *Theodizee – Klimaproblem und unsere Verantwortung - Gedanken zum Bericht der Präsidentin auf dem Leibniz-Tag 2022*. <https://leibnizsozietat.de/wp-content/uploads/2022/07/Wortmeldung-EBFL-Leibniz-Tag-fin.pdf>.
- Feistel Rainer, Ebeling, Werner (2011): *Physics of self-organization and evolution*. Weinheim; Berlin: Wiley – VCH.
- Fleischer, Lutz-Günther (2015): „Technologie–techné und epistémé“. *Technologiewandel in der Wissensgesellschaft – qualitative und quantitative Veränderungen*, hrsg. von Gerhard Banse/Ernst-Otto Reher. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät*, Bd. 122. Berlin: trafo-Verlag, 35-67.
- Rockström, Johan (2021): „Wie Kippunkte das Erdklima bedrohen“. *ZDF heute*. <https://www.zdf.de/nachrichten/politik/klimakrise-kippunkt-100.html> und „Risikoanalyse von Klima-Domino-Effekten: Kippelemente können sich gegenseitig destabilisieren“. *Potsdam-Institut für Klimaforschung. Startseite > Themen > Planetare Grenzen, Kipp-Elemente & globale Gemeinschaftsgüter*. <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/risikoanalyse-von-klima-domino-effekten-kippelemente-koennen-sich-gegenseitig-destabilisieren>.
- Steenbeck, Max (1978): „Die Verantwortung der Wissenschaftler im Atomzeitalter“. *Abriistung, Wissenschaft, Verantwortung*, hrsg. von Herbert Meißner/Karlheinz Lohs. Berlin: Akademie-Verlag.

E-Mail-Adressen der Verfasser: lg.fleischer@leibnizsozietat.de; woebel@email.de