



# Zu Problemen der mechanisch – chemisch – elektrischen Energiewandlung und des Transports hochwertiger Energie im Kontext des Klimawandels<sup>1</sup>

*Werner Ebeling, Rainer Feistel, Ernst-Christoph Haß und Peter Plath  
(Berlin, Rostock und Bremen, alle MLS)*

Veröffentlicht: 15. August 2023

## Abstract

We analyze the efficiency of conversions between different forms of energy as mechanical, chemical, thermal and electrical energy in the context of climatic change and suggest useful strategies. Further we discuss the possible consequences of human energy consumption and of several industrial processes for the further evolution of the world climate.

## Keywords / Schlüsselwörter

Forms of energy as heat, mechanical, chemical and electrical, efficiency of conversions, the main factors of negative consequences for the evolution of the climate of earth, possible strategies

Zum ersten Mal in der Geschichte der Menschheit  
sitzen heute alle Menschen in einem Boot.

*Ossip K. Flechtheim*

## 1. Einleitung

Wie zu allen Zeiten der Menschheitsentwicklung spielt auch heute die Nutzung von Energie eine zentrale Rolle. Der erste Hauptsatz der Thermodynamik, eines der wichtigsten Naturgesetze, lehrt uns, dass die Energie eine Erhaltungsgröße ist. Sie kann weder erzeugt noch vernichtet werden, kann aber verschiedene Formen von unterschiedlicher Wertigkeit annehmen, die ineinander umwandelbar sind unter Abnahme ihrer Wertigkeit (Ebeling u. Fleischer, 2022). Die Nutzung von Energie über geeignete Umwandlungen dieser Energieformen ist ein zentrales Problem menschlicher Tätigkeit (Ebeling u. Feistel, 1994; Hass u.a., 2018; Hass u. Plath, 2023; Ebeling, 2023). Unsere Tab. 1 bietet einen Überblick über den Verbrauch an wertvoller Energie in der Welt, in Europa und in der BRD. Der relativ geringe Anteil der BRD mit ca. 2 % zeigt, dass man neben der Energiesituation hierzulande unbedingt immer auch den Austausch mit dem Rest der Welt und den Gesamteffekt von Maßnahmen auf das Weltklima im Auge haben muss. Das Klima gehört zur gesamten Erde, ein isoliertes nationales oder europäisches Klima gibt es nicht.

Energieumwandlungen sind irreversible Prozesse, die mit Verlusten und Entropieerzeugung und häufig auch mit Selbstorganisation verbunden sind (Feistel u.a., 2011; Haken u.a., 2016). Das Problem besteht somit darin, die notwendigen Umwandlungen

<sup>1</sup> Zum Leibniztag 2023 dem Andenken an Lutz-Günther Fleischer (1938–2023) gewidmet, der einer der ersten Dozenten für irreversible Prozesse in Deutschland und langjähriger Vizepräsident der Leibniz-Sozietät war.

der Energie aus einer Form in die andere möglichst effizient zu gestalten, was heißt, solche auszuwählen, die mit möglichst geringer Entwertung verbunden sind. Zu den typischen Umwandlungsketten, die wir heute beobachten, gehören neben der Ausbeutung chemischer Ressourcen, die in der Vergangenheit in die Erde eingelagert wurden, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, besonders die Umwandlung von Windenergie oder von primärer Strahlungsenergie in elektrische Energie, die Umwandlung in chemische Energie in Batterien sowie nachfolgend die Rückwandlung wieder in elektrische und schließlich wieder in mechanische Energie, etwa zum Antrieb von Fahrzeugen. Bei einer Umwandlung von einer Form in eine andere findet in der Regel eine Entwertung der Energie statt, es wird Entropie erzeugt, der Prozess ist irreversibel, d.h. nicht vollständig umkehrbar. In der Regel wird bei jeder Umwandlung etwa ein Drittel der Energie irreversibel entwertet, wird etwa als Umgebungswärme verstreut, dissipiert, und geht für eine Nutzung als Arbeit verloren, kann aber als Wärme noch nützlich sein. Nur die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie oder andersherum ist fast ohne Entwertung, d.h. praktisch ohne Verluste, möglich. Auch Umwandlungen von mechanischer oder elektrischer Energie in Wärme sind verlustlos. Die Wärme geringer Temperatur ist eine Energieform, die relativ wertlos ist, allerdings kann man beim Übergang von Wärme höherer Temperatur in Wärme geringerer Temperatur elektrische oder mechanische Energie erzeugen, worauf die Wirkungsweise der Wärmekraftmaschinen beruht. Auf dem umgekehrten Prozess, der Anhebung von Wärmeenergie auf eine höhere Temperatur, d.h. einen höheren Wert, beruhen Wärmepumpen, die Zufuhr elektrischer Energie benötigen. In der Regel muss man, wie schon gesagt, bei den meisten Energieumwandlungen mit Verlusten um etwa ein Drittel der Energiemenge rechnen (Feistel u. Ebeling, 2011, 2017). Die unnötige oder ineffiziente Entwertung von Energie muss heutzutage, wo das Klima auf der Erde auf der Kippe steht, zu den Umweltsünden gerechnet werden. Wir benutzen hier den Begriff des Wertes in einem mehr intuitiven Sinn als absteigende Abfolge elektrischer und mechanischer Energie, chemischer Energie, Wärmeenergie hoher Temperatur, Wärmeenergie niedriger Temperatur. Die Menge an Energie kann wegen des Erhaltungssatzes nicht verloren gehen, wohl aber ihr Wert, der von der Physik über die Entropie des Systems bestimmt wird. Der Wert der Energie eines Systems kann von allein nur abnehmen, die Entropie steigt an, das sagt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser Prozess ist irreversibel, das heißt nicht umkehrbar, einmal erzeugte Entropie kann nicht wieder vernichtet werden. Der Wert der Energie, ausgedrückt durch die Entropie, ist, wie andere Wertmaße auch, eine emergente Eigenschaft (Feistel u. Ebeling, 2016).

Von der Öffentlichkeit und Politik wird heute die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Ausstoß priorisiert. Vom physikalisch-chemischen Standpunkt aus gesehen sollte aber die Vermeidung von Energieentwertung, d.h. von Entropieerzeugung und weiterer Ausbeutung der Ressourcen an erster Stelle stehen, denn nur die sind wirklich irreversibel und unumkehrbar. Man muss einfach zur Kenntnis nehmen, dass man mit Hilfe wertvoller Energie jederzeit CO<sub>2</sub> wieder aus der Atmosphäre entnehmen und in energetisch wertvolle Rohstoffe umwandeln kann. Das hat uns die Erdgeschichte gelehrt, denn vor Hunderten von Millionen Jahren hatte die Erde noch eine Atmosphäre, die mehr CO<sub>2</sub> als Sauerstoff enthielt, bis die Pflanzenwelt mit Hilfe von Sonnenlicht und Photosynthese die heutige Sauerstoff-dominierte Umwelt erzeugte (Ebeling u. Feistel, 1994). Wie die Erdgeschichte zeigt, ist das Hauptproblem nicht der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Erdatmosphäre, sondern die zu starke Entwertung der verfügbaren Energien, oder mit anderen Worten, die ineffiziente Nutzung des Stroms von Strahlungsenergie von der Sonne zur Erde und die zu starke Ausbeutung der in der Vergangenheit der Erde angelegten Vorräte. Physikalisch strenger ausgedrückt, sind es die Bilanzen der thermodynamischen Flüsse von Energie, Entropie und allen ausgetauschten

Stoffen, auch die von CO<sub>2</sub>, die relevant für die Zukunft unseres Planeten sind (Ebeling u. Feistel, 1994). Auch die Entscheider umweltpolitischer Maßnahmen sollten die physikalisch-chemischen Grundgesetze unbedingt beachten, weil sie sonst weniger effektive Maßnahmen priorisieren und vielleicht zu Fehlentscheidungen kommen könnten. Die physikalisch-chemischen Grundgesetze können niemals verletzt werden, sie sind absolut und unabhängig von Wollen und Wünschen. Als ein Beispiel, das wir noch betrachten werden, kann man den heutzutage von manchen mit Eifer geführten Kreuzzug gegen die chemische Speicherung von Sonnenenergie (e-fuels) sehen, der nicht naturwissenschaftlich, sondern nur ideologisch begründet ist. Auch die Kreuzfahrer sollten zur Kenntnis nehmen, dass auch die Speicherung in Batterien nur eine spezielle Form der Speicherung als chemische Energie ist, die zudem nicht besonders effektiv ist und den Einsatz sehr seltener und hochwertiger Elemente erfordert.

Auf der anderen Seite steht die von der Natur erfundene Photosynthese, ein biochemischer Prozess, der in Pflanzen, Algen und einigen Bakterienarten abläuft. Die Photosynthese erzeugt aus Licht, Wasser (H<sub>2</sub>O) und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) Glukose (C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>). Die Gleichung der Photosynthese lautet:  $6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 + \text{Lichtquanten} \rightarrow 6 \text{ O}_2 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ . Aus Glukose werden in der Natur die verschiedenartigsten energiereichen Naturprodukte hergestellt, auch Früchte, Getreide, Holz usw., und Glukose ist der Treibstoff, der die Bewegungen der Tiere antreibt. Die Energieumwandlungen in der Natur sind in der Geschichte der Evolution einem langen Optimierungsprozess unterworfen worden, haben meist einen hohen Wirkungsgrad und können auch der Technologie als Vorbild dienen (Ebeling u. Feistel, 1994).

In der oben erwähnten Arbeit untersucht Lutz-Günther Fleischer mit Koautor verschiedene spezielle Fragen der technischen Energieumwandlung und entwickelt fundierte Vorschläge, wie unsere Gesellschaft dringende technologische Probleme unserer Zeit lösen kann und welche Verantwortung dabei heute die Wissenschaft trägt (Ebeling u. Fleischer, 2022).

## 2. Bilanzen des gegenwärtigen Energieverbrauchs

Das wichtigste Ziel der Entwicklungen neuer Technologien ist, mit möglichst wenigen Umwandlungen der Primärenergien auszukommen, die notwendigen effizient zu gestalten und die verlustreichen strikt zu vermeiden. Das ist in der Tat in der gegenwärtigen Periode der Evolution der Menschheit die einzige vernünftige Überlebensstrategie. Wir stellten dazu schon in den 90ern folgende Überlegungen an (Ebeling u. Feistel, 1994): Wenn jeder der mehr als 8 Milliarden Erdenbürger einen Strom wertvoller Energie von 10 kW beanspruchen würde, ergäbe sich pro qm unseres 12 000 km dicken Erdballs schon ein Energiestrom von etwa 2/10 Watt. Das entspricht etwa der doppelten Leistung der Photosynthese. Ein Autofahrer, der täglich zwei bis drei Stunden Auto mit 100 kW Leistung fährt, den Abend am Fernseher verbringt und noch einige andere elektrische Geräte betreibt, kann es leicht auf 200–300 kWh pro Tag bringen, und damit im Durchschnitt auf 10 kW Verbrauch an wertvoller Energie. Der durchschnittliche tatsächliche Verbrauch pro Erdenbürger liegt inzwischen bei etwa 2,4 kW und steigt ständig an, in Deutschland liegt er sogar schon doppelt so hoch bei 5 kW und in den USA sogar mehr als dreimal so hoch bei fast 9 kW. Ein unbegrenztes Wachstum im Verbrauch wertvoller Energie über diese Zahlen hinaus ist naturwissenschaftlich gesehen unmöglich. Es macht u.E. keinen Sinn, immer nur auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Welt zu zeigen und den unverantwortlich hohen Energieverbrauch der Bürger einzelner Länder wie den USA und den EU-Staaten inklusive Deutschlands außer Acht zu lassen. Mit einiger Sicherheit würde ein weltweiter Verbrauch von mehr als 10 kW pro Bürger der Erde zu einem allgemeinen Kollaps führen. Das *privilegierte Fünftel* und einige in der Tabelle ausgewiesenen Länder haben diesen Stand schon fast erreicht bzw. in bestimmten Sparten schon überschritten; eine allgemeine Realisierung wäre eine energetische

und ökologische Katastrophe. Derzeit besteht die erklärte Hauptstrategie der Weltgemeinschaft darin, durch eine Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises in den sieben führenden Industriestaaten, den G7, und in der EU den CO<sub>2</sub>-Ausstoß so zu senken, dass negative Auswirkungen auf das Klima gestoppt werden. Davon abgesehen, dass die Klimadynamik nur schwer berechenbar ist (Dethloff, 2022) möchten wir unsere Skepsis ausdrücken, dass allein eine einzige ökonomische Maßnahme, die de facto planwirtschaftlich ist und auch noch niemals erfolgreich in großem Maßstab erprobt wurde, die Weltwirtschaft und das Weltklima in die gewünschte Richtung lenken wird. Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist diese Strategie zwar erfolgversprechend, aber nicht wirklich überzeugend, weil es keine Garantien gibt, dass nicht unerwünschte Nebenwirkungen wie Hungersnöte in weiten Teilen der Welt auftreten. Als Naturwissenschaftler würden wir lieber auf ein breites Spektrum möglichst erprobter Maßnahmen setzen. Wir haben dabei besonders gezielte (in Zukunft industrielle) Maßnahmen der Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und Einlagerung in das Meer und den festen Erdmantel im Auge. Solche Prozesse haben vor Jahrmilliarden die heutige (immer noch) lebensfreundliche Atmosphäre der Erde geschaffen und damit ist dieses Verfahren sozusagen schon erprobt und hat nachgewiesen, dass es geht und keine Katastrophen auslöst. Wer behauptet, dass die Einlagerung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre im Meer und im festen Erdmantel gefährlich und unerprobt sei, lässt es am notwendigen Respekt vor der Evolution des Lebens auf der Erde oder einfach nur an naturwissenschaftlichen Kenntnissen fehlen.

Wir diskutieren im Folgenden einige Strategien und Maßnahmen im Detail. Im Mittelpunkt stehen solche, die mit elektrochemischer und chemisch-mechanischer Energieumwandlung zu tun haben (Ebeling u. Feistel, 1994; Feistel u. Ebeling, 2011). Dabei schließen wir besonders auch Prozesse der direkten Umwandlung von chemischer in elektrische oder chemische Energie ein und beziehen auch Prozesse in der Bauindustrie ein, die mit einem Anteil von fast 10 % am industriellen Ausstoß von hoher klimatischer Relevanz sind. Wir weichen dem Zementproblem nicht aus, das in der Öffentlichkeit und Politik noch zu wenig Beachtung findet, ebenso wie dem heiklen Thema der klimatischen Folgen von Sprengstoff-Explosionen und Kriegen.

Unsere Tabelle 1 zeigt deutlich, wo die eigentlichen Probleme liegen, und die ungünstigen Positionen der USA, der EU und der BRD zeigen deutlich, dass die Strategie, immer mit dem Finger auf die Verantwortung anderer zu zeigen, keine gute Lösung darstellt. Es muss gelingen, den hauptsächlich fossilen Zuwachs des Energieverbrauchs von fast 1,3 % pro Jahr zu stoppen, und wir halten es nicht für zielführend, statt auf die eigentliche Ursache primär nur auf eine einzige der Folgen, nämlich die Erderwärmung, zu achten. Die Komplexität des Faktors Erderwärmung ist so groß, dass es fast unmöglich ist, die Verantwortlichkeiten dafür festzumachen. Das Klimaproblem ist eines der dringlichsten Weltprobleme unserer Zeit und erfordert eine gemeinsame Strategie, die nur in einer friedlichen Welt durchgesetzt werden kann. Dabei werden Verfahren der CO<sub>2</sub>-Entnahme aus der Atmosphäre oder bei industriellen Prozessen mit Sicherheit eine größere Rolle spielen. Der letzte Bericht des Weltklimarates IPCC hat deutlich gemacht, dass die Weltgemeinschaft deutlich mehr CO<sub>2</sub> einspeichern muss, um die Ziele des Pariser Abkommens noch zu erreichen. Mit anderen Worten, der CO<sub>2</sub>-Ausstoß muss nicht nur verringert werden, sondern der Atmosphäre muss auch gezielt mehr CO<sub>2</sub> entzogen werden. Zwei wichtige Verfahren werden CDR (Carbon Dioxide Removal) bzw. CCS (Carbon Capture and Storage) genannt. Mit CDR bezeichnet man Verfahren, die der Atmosphäre direkt CO<sub>2</sub> entnehmen und langfristig im Meer oder im Erdmantel binden. Mit CCS werden Verfahren bezeichnet, die den CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei industriellen Prozessen zumindest teilweise mittelfristig binden und speichern. Erstaunlicherweise protestieren Klimaschützer nun auch gegen die Empfehlungen des IPCC und konterkarieren damit

ihre hochgesteckten Ziele; denn, wenn das IPCC recht hat, wovon man ausgehen kann, haben zumindest einige der Klimaschützer eine falsche Sicht der tatsächlichen Lage, oder sie haben das Hauptziel aufgegeben und kämpfen auf Nebenschauplätzen. Das erinnert leider an eine bekannte Anekdote vom Untergang der Titanic: Eine britische Lady sagte zum Stewart, der sie von der Kabine zum Rettungsboot bringen wollte, sie weigere sich, mit ihrer neuen Frisur ein offenes Boot zu besteigen! Es steht zu befürchten, dass der Streit zwischen verschiedenen Fraktionen im Kampf gegen negative Klimaveränderungen ähnliche Folgen hat wie ein Streit zwischen Trainer und Aufsichtsrat einer Fußballmannschaft: Die hochgesteckten Ziele werden verfehlt! Aus unserer Sicht ist zwar eine Einlagerung von Kohlendioxid in Gesteine in Gasform noch nicht ausreichend erforscht, aber die Einlagerung in fester Form als Kohle oder als Kalziumkarbonat ist absolut sicher, denn das ist die natürliche Methode, die seit Jahrmilliarden funktioniert. Eine Einlagerung in flüssiger Form in der Tiefsee unter dem dort herrschenden Druck ist auf jeden Fall auch möglich und perspektivreich.

Wir erinnern daran: Im Pariser Übereinkommen von 2015 wurde das Ziel festgelegt, den Anstieg der globalen Mitteltemperatur auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellem Niveau zu beschränken und „Anstrengungen zu unternehmen“, den Anstieg sogar auf 1,5 °C zu begrenzen. Hierzu hat die Kommission der Europäischen Union (EU) als Teil des „European Green Deal“ 2019 das Ziel verkündet, die EU bis zum Jahr 2050 „klimaneutral“ zu machen. Dieses hochgesteckte Ziel dürfte wohl nur erreicht werden, „wenn alle an einem Strick ziehen“! Eine Analyse des Zwischenstands ergibt ein deprimierendes Bild und bietet jeden Anlass, daran zu zweifeln, dass die bisherigen Maßnahmen und Strategien zum Erreichen des großen Zieles ausreichen werden. Nach unserer Meinung hat das IPCC recht, wenn es dringlich fordert, die Maßnahmen in Richtung CDR und CCS zu verstärken. Wir halten das für wesentlich besser als immer neue Verbote auszusprechen und die Industrie zurückzubauen.

Tabelle 1 bietet einen Überblick über die gegenwärtige Situation aus physikalischer Sicht. Die gegenwärtigen ca. 20 000 GW Energieverbrauch der Erdbewohner entsprechen 40 mW/m<sup>2</sup> pro Erdoberfläche oder 2,4 kW pro Person. Langfristig gesehen ist die Sonne unsere einzige Quelle wertvoller Energie, sie liefert knapp 400 W/m<sup>2</sup>, also 10 000-mal so viel. Die BRD-Bürger verbrauchen 4,8 kW pro Person. Die US-Bürger verbrauchen bereits 8,6 kW pro Person. Würden alle Menschen auf dieser Erde so viel verbrauchen, entspräche das grob 160 mW/m<sup>2</sup>, also 1/2500 der Sonnenstrahlung. Nach unserer Meinung sollten alle Erdenbürger mit 10 kW pro Kopf komfortabel leben können, d.h. so lange nicht jeder ein eigenes Flugzeug, eine Villa in bester Lage und eine eigene Yacht beansprucht. Solange die Menschheit die Kernfusion noch nicht beherrscht, steht nur die Sonnenstrahlung zur Verfügung. Es ist ein technisches Problem, 1/2500 = 0.04 % der Sonnenenergie für die Nutzung durch die Menschheit abzuzweigen. Wir müssen dabei berücksichtigen, dass vom Sonnenlicht, das die Erdoberfläche erreicht, etwa 3/4 auf Ozeane trifft, wo ca. 100 W/m<sup>2</sup> absorbiert und in Wärme verwandelt wird. Über die Verdunstung werden unsere Wind- und Wasserkraftwerke angetrieben, die also letztlich auch die Energie von der Sonne beziehen. Die Flächen der Wüsten, Steppen und Gebirge sind insgesamt vermutlich groß genug, um mittels Photovoltaik die Menschheit mit elektrischer Energie zu versorgen, vielleicht sogar mit elektrolytischem H<sub>2</sub>, aber schon die Frage ist offen, ob dafür die notwendigen Ressourcen an erforderlichen seltenen Elementen ausreichen. Vielleicht ist eine zielgerichtete Aufforstung durchaus eine wesentlich kostengünstigere Alternative.

So weit so gut, die verfügbare Fläche würde theoretisch ausreichen, erforderte aber politische, ökonomische und technische Lösungen für die Befriedigung aller Bedürfnisse und Interessen. Krieg, Massenmigration, Nationalismus und religiöser Fanatismus, aber auch die teilweise extreme Steigerung persönlicher Ansprüche sind da kontraproduktiv. Dethloff

(2022) stellt fest: „Der globale Weg zu einer Massenkonsumgesellschaft hat planetare Auswirkungen auf die Lebens- und Klimabedingungen auf der Erde“ und er stellt auch fest: „eine monokausale Betrachtung, die durch Reduktion des Treibhausgases Kohlendioxid die Begrenzung des Klimawandels verspricht (ist) irreführend“. Im Angesicht der gemeinsamen Herausforderung des Klimawandels muss man mit den bisherigen Erfolgen unzufrieden sein, bisher jedenfalls steigt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch Erhöhung des Verbrauchs an Öl, Gas und Kohle in jedem Jahr noch deutlich weiter an. Bei pessimistischer Sicht muss man zweifeln, ob ohne neue, effektivere Strategien das 1,5 °C-Ziel der Klimakonferenzen so noch erreicht werden kann. Wir möchten hier zur kritischen Bewertung der alten und der Diskussion neuer Strategien beitragen und neben dem CO<sub>2</sub>-Problem auch weitere Faktoren diskutieren, wie z.B. die Konsequenzen eines steigenden Energieverbrauchs sowie der Entropieproduktion pro Kopf und Jahr. Wir schließen uns ausdrücklich der Feststellung des Klimaexperten Dethloff an, dass eine Bewertung nur auf Grund der CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht zielführend ist. Die Erdgeschichte hat uns gelehrt, dass CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht irreversibel sind, denn CO<sub>2</sub> kann der Atmosphäre mit Hilfe von Sonnenenergie wieder entnommen werden, entweder durch Photosynthese oder technisch durch CDR/CCS. Wirklich irreversibel sind nur Energieentwertung und damit verbundene Entropie-Emissionen. Die natürlichen Prozesse der Bindung von CO<sub>2</sub> durch die Meere und Gesteine verlaufen viel langsamer als die aktuelle Freisetzung durch den Menschen (Bender, 2013). Das müssen auch hochbezahlte TV-Experten zur Kenntnis nehmen, die vorrechnen, es wäre klimafreundlicher, einen Tag lang mit einem tonnenschweren Elektro-SUV zu fahren als mit einem kleinen 100 kW Diesel PKW. Eigentlich müssten sie genau wissen, dass der Fahrer eines schweren Elektroautos nach 8 Stunden Verbrauch von 200 kW mit etwa über 1000 kWh Energieverbrauch das durchschnittliche Kontingent eines Menschen der Erdbevölkerung schon weit überschritten hat, welches nur etwa 100 kWh pro Tag beträgt. Man bedenke, dass um das Jahr 2000, als der intensive Kampf gegen die Klimaerwärmung begann, der weltweite Elektroenergieverbrauch nur 1700 GW betrug und heute schon 1900 GW. Wir haben auch zu bedenken, dass heute 4/5 der vom Fahrzeug verbrauchten Elektroenergie aus fossilen Quellen stammen. So gibt die aus Tabelle 1 auszulesende Information, dass der Verbrauch fossiler Energien der Welt immer noch pro Jahr um etwa 200 GW zunimmt, eher Grund zur Beunruhigung als zur Selbstzufriedenheit. Denn selbst dann, wenn künftig einmal dieser Verbrauch abnimmt, steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre trotzdem weiterhin an, und die Trägheit des globalen Klimasystems wird den jetzigen Trend der Erwärmung noch über eine kaum bekannte Dauer unvermeidlich nachwirken lassen. Es ist eine fatale Illusion zu hoffen, dass die globalen Temperaturen unmittelbar sinken würden, wenn nur die Emission von CO<sub>2</sub> nicht mehr zunähme.

Tab. 1 Überblick über den Energieverbrauch im Jahresmittel (Welt, EU, BRD). Die statistischen Zahlen sind der aktuellen (April 2023) Veröffentlichung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz entnommen und zur Vereinfachung hier gerundet wiedergegeben (\*Pressemeldung dpa vom 19. Juli 2023).

| Verbraucher        | GW            | Bemerkung                      | kW pro Kopf |
|--------------------|---------------|--------------------------------|-------------|
| <b>Welt (2019)</b> | <b>19 000</b> | <b>250 GW Zuwachs pro Jahr</b> | <b>2.4</b>  |
| davon Strom (2017) | 2 900         |                                | 0.4         |
| China (2019)       | 4 000         |                                | 2.9         |
| USA (2019)         | 2 900         |                                | 8.6         |
| <b>EU (2019)</b>   | <b>1 900</b>  | <b>10 % der Welt</b>           | <b>4.2</b>  |
| Indien (2019)      | 1 200         |                                | 0.8         |
| Japan (2019)       | 500           |                                | 4.0         |

|                               |            |                                   |            |
|-------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| <b>BRD brutto (2020)</b>      | <b>380</b> | <b>20 % der EU, 2 % der Welt</b>  | <b>4.8</b> |
| BRD Haushalte brutto          | 110        | 0.6 % der Welt                    | 1.4        |
| BRD Industrie brutto          | 108        |                                   | 1.4        |
| BRD Verkehr brutto            | 105        |                                   | 1.3        |
| BRD Gewerbe brutto            | 58         |                                   | 0.7        |
|                               |            |                                   |            |
| <b>BRD netto</b>              | <b>262</b> | <b>= brutto – techn. Verluste</b> | <b>3.3</b> |
| BRD Heizen netto              | 89         |                                   | 1.1        |
| BRD Kraftstoffe netto         | 70         |                                   | 0.9        |
| BRD Strom netto               | 55         |                                   | 0.7        |
|                               |            |                                   |            |
| <b>BRD private Haushalte</b>  | <b>76</b>  |                                   | <b>1.0</b> |
| davon für Heizung             | 52         |                                   | 0.7        |
| und für Warmwasser            | 12         |                                   | 0.2        |
|                               |            |                                   |            |
| BRD fossile Quellen (2020)    | 317        | 83 % des BRD-Verbrauchs           | 4.0        |
| <b>BRD erneuerbare (2020)</b> | <b>63</b>  | <b>17 % des BRD-Verbrauchs</b>    | <b>0.8</b> |
| davon Holz etc.               | 17         |                                   | 0.2        |
| und Wind                      | 15         |                                   | 0.2        |
| und Biogas                    | 14         |                                   | 0.2        |
| und Photovoltaik              | 6          |                                   | 0.1        |
| und Wasserkraft               | 2          |                                   | 0.02       |
|                               |            |                                   |            |
| BRD Windparks Nordsee         | 11         | 2010 - 2027                       | 0.1        |
| BRD Windparks Ostsee          | 3          | 2011 - 2026                       | 0.04       |
| BRD Windkraft an Land         | 59*        | 2023                              | 0.7        |
| BRD Windkraft an Land         | 115*       | geplant bis 2030                  | 1.4        |

Zahlen sind unbestechlich und sagen dem Naturwissenschaftler mehr als viele fromme Reden. Man sieht z.B., dass das Ziel, den Hauptteil der 90 GW Energie für Heizen in Deutschland durch Wärmepumpen zu erbringen, mindestens 30 GW zusätzliche Elektroenergie erfordern werden, hauptsächlich im Winter, die beim gegenwärtigen Stand der Erzeugung erneuerbarer Energien nicht bilanzierbar sind. Wenn man die erforderlichen Windkraftwerke nicht vor der geplanten Umstellung des Heizens auf Wärmepumpen fertigstellt, muss die Leistung durch Kohlestrom erbracht werden, was dem Klima leider nur weiteren Schaden zufügen wird.

### 3. Chemisch – mechanische Umwandlungen

Der Prototyp chemisch-mechanischer Energieumwandlung sind die Otto- und Dieselmotoren, die wesentlich im 19. Jh. in Deutschland entwickelt wurden und die heute eine sehr hohe technische Qualität erreicht haben. Moderne Ottomotoren mit flüssigem Kraftstoff (Benzin) erreichen Wirkungsgrade von 25–35%. Dieselmotoren erreichen einen Wirkungsgrad von 35–45%. Wirkungsgrad heißt hier und im Folgenden immer das Verhältnis von erzielter Energiemenge der gewünschten Form zur primär eingesetzten Energiemenge. Mehr als die Hälfte oder sogar drei Viertel der im Kraftstoff enthaltenen chemischen Energie werden also gar nicht für den Antrieb verwendet, sie werden als Abwärme dissipiert. Bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen liegt der Wirkungsgrad der

Umwandlung elektrischer Energie in Antriebsenergie bei über 90%. Das darf aber nicht missverstanden werden. Leider ist es bisher nicht möglich, gespeicherte elektrische Energie mitzuführen, das ginge nur über Kondensatoren, die aber bisher nur geringe Kapazitäten erreichen. Praktisch wird die elektrische Energie heutzutage nur in chemischer Form, in aufgeladenen Akkumulatoren mitgeführt, die ständige Wiederaufladung benötigen (Hass u. Plath, 2023). Beim heutigen Stand der Technik sind Elektroautos noch Umwandler chemischer in mechanische Antriebsenergie, lediglich auf einem Umweg über den Akkumulator, dessen Wirkungsgrad somit für Kraftfahrzeuge den kritischen Punkt darstellt. Alternativ werden Brennstoffzellen verwendet, die chemische Energie direkt in elektrische Energie verwandeln, ihr Wirkungsgrad liegt zwischen  $1/3$  und  $2/3$ . *Akkumulatoren* (Sekundärbatterien) sind chemische Speicher elektrischer Energie, die nach dem Entladen wieder aufgeladen werden können, während man unter Batterien im engeren Sinne *Primärbatterien* versteht, die nach einmaliger Nutzung unbrauchbar werden. Die Medien haben in der Diskussion um die E-Mobilität diese Begriffe oft inkorrekt verwendet und zunehmend verwischt.

Es gibt zwar noch ein breites Spektrum von Möglichkeiten, aber der Betrieb von Motoren auf Basis fossiler Brennstoffe sollte nach heutigem breiten Konsens wegen der CO<sub>2</sub>-Bilanz keine Zukunft haben. Daraus folgt nach unserer Auffassung keineswegs zwingend ein Verbot von Verbrennungsmotoren, sondern nur von Verbrennungsmotoren, die auf der Basis fossiler Brennstoffe arbeiten und CO<sub>2</sub> erzeugen. Es folgt eigentlich nur, dass die fossilen Kraftstoffe durch Kraftstoffe abgelöst werden müssen, die mit Sonnenenergie aus Wasser und CO<sub>2</sub> hergestellt werden, heute oft e-fuels genannt. Die Speicherung von elektrischer Energie in e-fuels kann, vom physikalisch-chemischen Standpunkt aus gesehen, nicht anders eingestuft werden als die Speicherung als chemische Energie an den Elektroden des Akkumulators. Leider gibt es auch auf diesem Feld unter der Klimarettern mehrere Fraktionen; deren erste und bisher dominante setzt ausschließlich auf E-Mobilität, womit Akkumulator-gespeiste Fahrzeuge gemeint sind, die andere Fraktion plädiert für Technologieoffenheit und möchte künstliche Kraftstoffe zulassen. Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist Offenheit immer die bessere Strategie; warum sollten Politikwissenschaftler mehr von der technischen Zukunft verstehen als Ingenieure?

Ein eventuelles Verbot des Einsatzes von e-fuels für den Antrieb von Motoren ist nur als politisch begründbare Maßnahme zu sehen, denn aus physikalisch-chemischer Sicht sind sie der Speicherung an Elektroden gleichwertig; in beiden Verfahren wird Elektroenergie erst als chemische Energie gespeichert. Der Unterschied liegt nur in der Rückverwandlung, die einmal elektrochemisch erfolgt oder alternativ durch Oxidationsprozesse. Auch die lebenden Systeme erzeugen die notwendige Bewegungsenergie durch Oxidation von „Kraftstoffen“ wie Glukose.

Im Prinzip sind e-fuels, vom physikalisch-chemischen Standpunkt aus gesehen, nichts anderes als eine Form gespeicherter Sonnenenergie in chemischer Form, also eine moderne Art hochwertiges künstliches Holz oder künstliche Kohle. Ebenso wie Holz oder Kohle weder gut noch schlecht sind, sie sind einfach die von der Natur entwickelten Hauptformen der Speicherung von Sonnenenergie, so sind auch e-fuels nur eine moderne Form von chemisch gespeicherter Sonnenenergie und keine Umweltsünde, wie einige Entscheider und Journalisten, denen ausreichende naturwissenschaftliche Kenntnisse fehlen, zu glauben scheinen. Da man technologische Entwicklung im Detail nicht vorhersagen kann, ist auch die Rolle von e-fuels in 10–20 Jahren im Detail kaum vorhersehbar. Sie sind zumindest ein ernsthafter Kandidat für den Antrieb von Flugzeugen, die Probleme mit schweren Akkumulatoren haben. Seit den visionären Forschungen des Aachener Chemikers Friedrich Asinger kann die Methanol-Technologie als zukunftsfähig betrachtet werden (Bertau u.a.,



2014). Das ist allerdings nicht das einzige Beispiel perspektivreicher Technologien. In letzter Zeit hört und liest man fast täglich Kommentare, die der Herstellung und Nutzung von e-fuels einen „extrem schlechten Wirkungsgrad“ unterstellen. Solche Behauptungen können nur solche „Experten“ aufstellen, die nichts über unsere Natur wissen, nie von Photosynthese gehört und keine Ahnung vom Leben und von Naturgeschichte haben. Die Photosynthese sorgt seit Jahrmilliarden für fast alle lebenswichtigen Stoffe wie Stärke, Eiweiß, Vitamine, Hormone usw. (alles spezielle „e-fuels“), mit ausgezeichneten Wirkungsgraden. Vor diesem historischen Hintergrund wirken Behauptungen, der Einsatz von e-fuels wäre grundsätzlich unmöglich oder unzumutbar, sehr naiv und demonstrieren nur mangelnde naturwissenschaftliche und naturhistorische Kenntnisse. Wer fordert, in der EU bald keine mit synthetischen Kraftstoffen betriebene Motoren mehr zuzulassen, muss konsequenterweise auch fordern, dass die Standesämter keine Kleinkinder mehr registrieren, was die Absurdität dieser Forderung verdeutlicht. Alle lebenden Systeme erzeugen mechanische Energie durch Oxidation von Glukose und anderen energiereichen Stoffen.

Um Missverständnisse zu vermeiden, kein verantwortungsvoller Wissenschaftler kann heute mit Sicherheit voraussagen, welche chemischen Verbindungen das Rennen um den Antrieb technischer Motoren machen werden, denn es gibt Millionen von Wasserstoff-Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindungen, aber die künstliche Photosynthese solcher Verbindungen ist mit Sicherheit ein sehr aussichtsreicher Weg. Eine Beschränkung auf Akkumulatoren, die so viele seltene Elemente benötigen, hat eigentlich keinen tieferen naturwissenschaftlichen, sondern höchstens nur einen ideologischen Sinn. Energiespeicherung in Akkumulatoren ist nichts anders als eine recht spezielle chemische Speichermethode unter vielen Alternativen, die zudem seltene und wertvolle Elemente benötigt, die nur in wenigen Ländern vorkommen und deren Vorräte nur für absehbare Zeit reichen werden. Wenn hier einseitig argumentiert wird, fragt der Naturwissenschaftler nach tieferen Gründen und vermutet sie in den Finanzen, es geht ja hier um Milliarden von Investitionen, und schon im Mittelalter haben die Minnesänger ihren Herrscher, einen Grafen oder Fürsten, gepriesen und Geschichten von seinen Heldentaten erzählt und wussten: „Wes Brot ich ess, des Lied ich sing“. Wir meinen, dass wichtige Entscheidungen über Zukunftstechnologien von Technikern auf sachlicher Basis und nicht durch Kompromisse zwischen Fraktionen, in denen heute kaum Techniker sitzen, erzielt werden sollten.

Statt hier noch näher auf Akkumulatoren einzugehen, verweisen wir auf unser 5. Kapitel und auf eine extra Untersuchung (Hass u. Plath, 2023). Hier wollen wir aber noch einige bisher weniger beachtete Probleme von Energiewandlungen und CO<sub>2</sub>-Produktion diskutieren, die mit der Bauindustrie zusammenhängen. Die Bauindustrie ist bekanntlich von zentraler Bedeutung für die moderne Gesellschaft und zu einem erheblichen Teil, fast 10%, an den Energieumsätzen beteiligt. So wurden z.B. im Jahr 2018 in Deutschland 33,7 Millionen Tonnen Zement hergestellt und 2019 waren es bereits 34,2 Millionen Tonnen Zement. (Verein Dt. Zementwerke, 2019, 2020): „Die Herstellung einer Tonne Zement ist in Deutschland mit CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 600 kg verbunden – ca. zwei Drittel davon entfallen auf Rohstoff-bedingte Prozessemissionen, nur ein Drittel auf Brennstoffemissionen. In Summe belaufen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Zementindustrie hierzulande aktuell auf etwa 20 Mio. Tonnen, was etwa 2% der nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen entspricht.“ (Verein Dt. Zementwerke, 2020). Nach Angaben von ARD alpha sind es weltweit 2,8 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>, die so entstehen. Das sind etwa 8% der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen (v. Liebe u.a., 2023).

Für die Baustoffindustrie ist Kalkstein CaCO<sub>3</sub> einer der wichtigsten Rohstoffe. Er wird in Bergwerken im Tagebau gebrochen, in Kalk- bzw. Zementwerken unter hohem Energieaufwand gemahlen und als sogenannter Branntkalk hergestellt. Mit Hilfe eines Brennstoffes

(Kohlenstaub oder das Material der „gelben Säcke“) wird der gemahlene Kalk in Drehrohröfen bei großer Hitze (900 °C) in gebrannten Kalk umgewandelt (Kalzinieren). Auf Grund der natürlichen Beschaffenheit des Kalks und der Brennstoffe und der dadurch bedingten jeweils erforderlichen Prozessführung weist der Branntkalk nach dem Brennen ein unterschiedliches Verhalten hinsichtlich seiner Qualität, des Energieverbrauchs, der Qualität des gebrannten Kalks und der CO<sub>2</sub>-Bilanzen auf. Dieser Vorgang ist mit einer sehr großen Produktion von Kohlendioxid CO<sub>2</sub> verbunden, da das gesamte im Kalk als Karbonat-Ion CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> enthaltene CO<sub>2</sub> und die für die Hitzeerzeugung verwendete Kohle bzw. die Kohlenwasserstoffe aus dem Müll (sog. Alternative Rohstoffe, u.a. Material der „gelben Säcke“, Klärschlamm, Altreifen, ...) in CO<sub>2</sub> verwandelt und freigesetzt werden. In einem zweiten Schritt wird dann der gebrannte Kalk bzw. das Kalziumoxid CaO mit Sand bzw. Kies (SiO<sub>2</sub>) gemischt und gemahlen und mit tonigen Materialien (z.B. Betonit, Kaolin) und eventuell weiteren mineralischen Zusatzstoffen vermischt und in Drehrohröfen unter Zusatz von Brennstoffen bei ca. 1450 °C zu Zementklinker gebrannt (Klinkerbrand). Dabei kommt es zu einer Sinterung der verschiedenen Mineralien.

Bei der Zementherstellung wird wertvolle Energie entwertet und CO<sub>2</sub> freigesetzt. In Deutschland beträgt der Energieeinsatz in der Zementindustrie, der sich aus den eingesetzten Brennstoffen und dem für den Betrieb erforderlichen elektrischen Strom ergibt, jährlich ca. 30 TWh<sup>2</sup> entsprechend 3 GW im Mittel. Dabei entfallen 90% der Gesamtenergie auf den Brennvorgang und nur 10% auf den Stromverbrauch, der hauptsächlich bei den Mahlprozessen anfällt (von Liebe u.a., 2023). 3 GW ist knapp 1% des gesamten deutschen Energieverbrauchs und ist die Leistung aller deutscher Ostsee-Windparks, siehe Tab. 1.

Zement ist das zentrale Bindemittel für die Herstellung von Zementmörtel oder Beton, welcher ein Gemisch aus Zement, Wasser und Zuschlagstoffen wie Sand und Kies ist. Anders als bei klassischem Kalkmörtel, der aus Branntkalk CaO und Sand besteht, entnimmt der Zementmörtel oder Beton beim Prozess des Abbindens in der Atmosphäre bzw. im Wasser in erster Linie nicht wieder CO<sub>2</sub> auf, um die festen Körper der fertigen Baustoffe zu bilden. Beim Klinkerbrand entstehen bei Temperaturen über 1000 °C aus dem Kalziumoxid CaO und dem Silikat SiO<sub>2</sub> der beigefügten Sande und Tonmineralien (Alumosilikate) die Trikalziumsilikate 3 CaO·SiO<sub>2</sub> („Alit“), bzw. die entsprechenden Aluminate, die gemeinsam für die Eigenschaften des Zements verantwortlich sind. Bei noch höheren Temperaturen (1250 °C und höher) beginnt das Gemisch zu erweichen und sintert bei 1400 °C bis 1500 °C zu 2–3 cm großen Klumpen bzw. Klinkern zusammen, die nach Abkühlung wieder zermahlen werden müssen. Das Abbinden des Zementmörtels geschieht durch die Reaktion mit Wasser unter Bildung von Kalziumsilikat CaSiO<sub>3</sub> und Kalziumhydroxid Ca(OH)<sub>2</sub>. Letzteres reagiert mit der Zeit mit dem Kohlendioxid der Luft natürlich auch wieder zu Kalk und Wasser. Kalkmörtel und Zementmörtel und Beton halten Bauwerke zusammen (Holleman u. Wiberg, 1960), die CO<sub>2</sub> binden.

Grundsätzlich schafft die Bauindustrie Festkörperstrukturen und setzt dabei besonders chemische Energien in Form von Baustoffen, insbesondere Zement, ein. Der chemische Grundprozess ist der des Kalkbrennens, d.h. die Umwandlung von Kalkstein, der im Wesentlichen aus Kalziumkarbonat CaCO<sub>3</sub> besteht, in Kalziumdioxid CaO, das zu Zement verarbeitet wird. Zement nimmt aus der Luft wieder Sauerstoff auf und erzeugt Festkörperstrukturen. Jedes Bauwerk repräsentiert gebundene hochwertige mechanische Energie in Form fester Strukturen. Wenn ein Gebäude zerfällt, abgerissen oder zerstört wird, so wird diese hochwertige mechanische Energie irreversibel in Wärme umgewandelt.

---

<sup>2</sup> 1 TWh (Tera-Watt-Stunden) = 1 Milliarde Kilo-Watt-Stunden. 1 TWh pro Jahr = 0,114 GW zum einfachen Vergleich mit Tab. 1

Was die Freisetzung von CO<sub>2</sub> betrifft, hat der Gesamtprozess keine dramatischen Auswirkungen auf das Klima, da ja ein großer Teil des beim Brennen freigesetzten Kohlendioxids CO<sub>2</sub> wieder in Form von Kalk gebunden wird. Aber die Prozesse des Brennens und Abbindens fallen zeitlich und räumlich nicht zusammen und laufen zudem auf ganz unterschiedlichen Zeitskalen ab, so dass es in der tieferen Atmosphäre durchaus zu einer erheblichen Anreicherung von CO<sub>2</sub> kommt. In modernen Verfahren, die unter CCS-Technologien fallen, wird der freiwerdende Kohlenstoff abgesondert und gespeichert. Deutsche Klimaschützer bezeichnen ohne jede Begründung CCS-Technologien als umstritten und gefährlich, obwohl sie vom UN-Weltklimarat IPCC empfohlen werden. So muss man sich nicht wundern, dass (laut FOCUS, 17.06.2023) das Unternehmen Heidelberg Materials die erste Großanlage zur Abscheidung von Kohlenstoff bei der Zementproduktion und seiner unterirdischen Lagerung in Norwegen baut.

Die in Deutschland gerade beabsichtigte Umstellung der Energieproduktion auf erneuerbare Energien und die derzeitigen Überlegungen zu einem verbilligten Industriestrom lassen ein neuartiges von L.D. Ellis 2019 vorgeschlagenes Verfahren zur elektrochemischen Erzeugung von Zement als sehr interessante Zukunftslösung erscheinen (Ellis u.a., 2020). Der Vorschlag beruht auf einer Hydrolyse von aufgeschlämmtem Kalk, wobei die Gase Wasserstoff H<sub>2</sub>, Sauerstoff O<sub>2</sub> und Kohlendioxid CO<sub>2</sub> in reiner, wiederverwendbarer Form gewonnen werden. Statt des beim Kalkbrennen entstehenden Kalziumoxids CaO entsteht bei dem elektrochemischen Prozess Kalziumhydroxid Ca(OH)<sub>2</sub>. Die chemische Machbarkeit des Hydrolyse-Prozesses von Kalk ist bereits bewiesen und auch die Eignung des Kalziumhydroxids für den Klinkerbrand des Zements. Eine ausführliche Darstellung dieses Prozesses werden wir in einem gesonderten Artikel behandeln (Plath u. Hass, 2023a). Es bedarf jedoch noch einer Vielzahl weiterer physikalisch chemischen Untersuchungen und der Entwicklung geeigneter technischer Verfahrensschritte.

Man kann also eine CO<sub>2</sub>-emissionsfreie Zementindustrie auf der Basis der Hydrolyse von Kalk aufbauen (elektrochemisches Verfahren), wenn man den Strom aus erneuerbaren Energien dazu verwendet, den Klinkerbrand mit Hilfe des selbst erzeugten Wasserstoffes durchführt und das auch bei der Hydrolyse entstehende, aber reine CO<sub>2</sub> wieder chemisch speichert, z.B. in Form von Methanol. Diese Variante der Zementerzeugung ist erfolversprechend und verdient u.E. besondere Aufmerksamkeit.

Wenn es außerdem gelingt, größere Mengen des Kohlenstoffs, den die Bauindustrie freisetzt, im Erdmantel langfristig zu binden, könnte die Bautätigkeit vom Nullsummenspiel zu einer Technologie zur Klimaverbesserung avancieren. Es ist vielleicht nicht notwendig, zu unterstreichen, dass das Bedürfnis nach Behausung zu den wichtigsten Erfordernissen menschlicher Existenz gehört und bleiben wird. Die Errichtung und Erosion ganzer Gebirgsketten wird von der Erde seit Jahrtausenden als „Nullsummenspiel“ betrieben.

#### 4. Die Rolle von Eruptionen und Explosionen für die Klimaentwicklung

Seit historischer Zeit ist bekannt, dass Vulkanausbrüche dramatische Folgen für das Klima der Erde hatten. Wir müssen davon ausgehen, dass die bisher größten Schwankungen des Klimas wahrscheinlich von erdgeschichtlichen Katastrophen wie Einschlägen von Meteoriten und Vulkaneruptionen ausgelöst worden sind. Wir zählen einige der letzten klimarelevanten großen Ausbrüche in der Reihenfolge ihrer Klimarelevanz auf (Wikipedia, „Vulkanexplosivitätsindex“, 2023):

- **Toba-Ausbruch** (auf Sumatra) vor ca. 74000 Jahren (Rang 8)  
Bei dieser supermassiven Eruption wurden ca. 2800 km<sup>3</sup> Magma ausgestoßen.
- **Phlegräische Felder** (Süditalien) vor ca. 39 000 Jahren (Rang 7),  
letzter größerer Ausbruch (1538) vor ca. 500 Jahren (Rang 2)

- **Laacher Vulkan** (Vulkan-Eifel, Deutschland; 11056/10920/10930 v.u.Z.) vor ca. 13.000 Jahren (Rang 6)
- **Santorin-Ausbruch – Thera Vulkan** (Ägäis, 1628/1613 v.u.Z.) vor ca. 3600 Jahren (Rang 6 bis 7)
- **Tambora-Ausbruch** (Sumbawa/Java, Indonesien, 1815) vor ca. 200 Jahren (Rang 7)
- **Krakatau-Ausbruch** (Sundastraße/Indonesien, 1883) vor ca. 150 Jahren (Rang 6)  
Die Energie des Ausbruchs betrug je nach Quelle 130 Megatonnen oder zwischen 200 und 2000 Megatonnen TNT-Äquivalent.
- **Vesuv-Ausbruch** (Süditalien, 79 n.u.Z.) vor ca. 1900 Jahren (Rang 6).

Der Rang ist ein logarithmisches Maß und bezieht sich auf die Stärke des vulkanischen Ereignisses (Vulkanexplosivitätsindex, abgekürzt VEI), gemessen am Ausstoß. Vulkan-Ausbrüche zählen zu den starken klimarelevanten Faktoren, die jederzeit und an vielen vulkanischen Standorten akut werden können und praktisch nicht beeinflussbar sind, man kann nur ihre Folgen bekämpfen. Christopher G. Newhall und Stephen Self schreiben in einer weithin bekannten Studie (Self, 2006): „In this regard, it will not necessarily take a super-eruption to cause a Northern Hemispheric environmental disaster. A repeat of even a modest, Tambora-sized eruption (M6, or up to 45 km<sup>3</sup> of magma) in the appropriate location can be expected to cause a severe, widespread effect from ash and aerosols“. Wie dramatisch diese Folgen sein können, haben die neueren, erdgeschichtlich gesehen relativ schwachen Ausbrüche des Shinmoe-dake in Japan (2011 und 2017/18) vom Rang 3 VEI und des Eyjafjallajökull (2010) vom Rang 4 VEI auf Island gezeigt. Der 1420 m hohe Vulkan Shinmoe-dake hatte 2011 Asche und Gestein in die Atmosphäre gespuckt. Die Asche sei dabei bis in eine Höhe von 4000 Metern (Rang 3 VEI) geschleudert worden (Spiegel Online, 13.03.2011). Wenige Jahre später erfolgten weitere Ausbrüche 2017 und 2018 vom Rang 3 (VEI) entsprechend der Höhe der Eruptionssäule von 5 km (ORFat, 05.04.2018).

Die erwähnte Tambora-Eruption von 1815, die ca. 30–45 Kubikkilometer Material ausgestoßen hatte, hat nachweislich ernste globale klimatische Effekte gehabt. So sank im Folgejahr die globale Durchschnittstemperatur um 1 °C, und es wurde über weltweite Schlechtwetterperioden mit Missernten und folgenden Hungersnöten berichtet. Der schwächere Ausbruch des Laki in Island (1783, Stärke: VEI 4 = Rang 4) hat 30 Jahre vorher noch dramatischere Klimafolgen für Europa gehabt und soll mit zu den Faktoren gehört haben, die zum Aufstand des hungernden französischen Volkes 1789 geführt haben.

Eine sehr bedeutende Vulkaneruption ereignete sich im Jahre 1628 v.u.Z. auf der Insel Santorin (ehemals: Thera), die zu Griechenland gehört. Sie war mit einem Ascheregen verbunden, der bis nach Kreta reichte und einem Tsunami, dessen Flutwelle die Küste Phöniziens erreichte. Dieser auch als Minoische Eruption bezeichnete Ausbruch hatte starke Auswirkungen auf weite Teile des Ägäis-Raumes. Die langfristigen Folgen der Eruption werden heute als Grund für den Untergang der spätbronzezeitlichen Kultur der Minoer angesehen (Wikipedia, „Minoische Eruption“, 2023; Spiegel Online, 05.01.2022).

Der schwefelreiche Ausbruch des Vulkans Laacher See in der Eifel, der einen Tsunami im Rheingebiet auslöste und dessen Ablagerungen heute gut erforscht sind, wird als Auslöser der Klimaanomalie der jüngeren Dryas-Kaltzeit diskutiert (Wikipedia, „Laacher See“, 2023; Baldini u.a., 2018). Als Jüngere Dryaszeit wird die Eiszeit von 10730 bis 9700 ± 99 bezeichnet, die Nordeuropa bis zu den Alpen erfasste (Wikipedia, „Jüngere Dryaszeit, 2023). Es kam zu einem schnellen Temperaturabfall und einer Vereisung auf der Nordhalbkugel der Erde. Daraufhin betrug in Mitteleuropa die mittlere Jahrestemperatur -3 bis -4 °C, während sie in der darauffolgenden Erwärmungsphase bei ca. +4 °C lag. Verbunden war das Einsetzen der Jüngeren Dryas-Kaltzeit mit einem plötzlichen, langanhaltenden Schneefall (Wang u.a.,

2018). Selbst die an das Leben in der arktischen Tundra angepassten Mammute wurden stehend vollständig eingeschneit. Verbunden war diese Kopplung der Ereignisse mit einem grundlegenden Wechsel der Kulturen und damit der Götterwelten der in den betroffenen Regionen lebenden Menschen (Berger, 1987/88). Dieser Aspekt wird in der heutigen Klimadiskussion völlig ausgeblendet.

Ganz aktuell erwähnt der amerikanische Präsident Biden die Aufspannung eines schwefelhaltigen bzw. SO<sub>2</sub>-Aerosole enthaltenden „Sonnenschirmes“ zur Abkühlung der mittleren Erdtemperatur (Klein, ZDF, 2023). Jedoch sind die regionalen klimatischen Folgen eines so gravierenden Geo-Engineerings kaum realistisch vorhersehbar.

Auch wenn der UNO-Bericht 2013 zum Klima zu dem Schluss gelangt ist, dass natürliche Faktoren in letzter Zeit einen geringeren Einfluss auf das Klima gehabt haben, so wäre es unverantwortlich, daraus zu schließen, dass das weiterhin immer so sein wird. Die Schwankungen der natürlichen Faktoren arbeiten ständig, aber auf längeren Zeitskalen, Eruptionen der Stärke von Tambora könnten sich alle 50–100 Jahre wiederholen. Man sollte daher u.E. durchaus auf eine größere Eruption in der nächsten Zeit vorbereitet sein, während der Einschlag eines großen Meteoriten für weniger wahrscheinlich gehalten wird.

Die Eruptionen von Vulkanen sind natürliche Ereignisse, die wir nicht beeinflussen können, wohl aber die Rolle von künstlich herbeigeführten Detonationen von Sprengstoffen, deren Rolle seit dem Mittelalter immer weiter angewachsen ist. Nach unseren Abschätzungen stellen die Detonationen von Bomben und Granaten heute eine echte Bedrohung für die Evolution des Klimas dar. Neben dem friedlichen und insgesamt nützlichen Einsatz von Sprengstoffen, der pauschal die schnelle Umwandlung von gespeicherter chemischer Energie in mechanische explosive kinetische Energie der Zerstörung darstellt, denken wir besonders an die militärische Nutzung moderner Sprengstoffe, wie z.B. Pentasit (Nitropenta). Die Bombenkriege der letzten 100 Jahre waren wichtige Klimafaktoren, bei denen immer mehr Sprengkraft eingesetzt wurde. Moderne nichtnukleare Bomben haben eine Sprengkraft von 1–50 t TNT.<sup>3</sup> Im Irakkrieg, der die USA nach Stiglitz ca. 3 Billionen Dollar gekostet hat, wurden geschätzt ca. 30 000 Bomben u.a. Sprengkörper eingesetzt, entsprechend mindestens 30 000 t TNT (Stiglitz, 2010). Nimmt man konservativ geschätzt an, dass 1 t TNT einen Würfel von 10\*10\*10 Kubikmeter zerstört, d.h. etwa 1000 Kubikmeter Gebäude, kommen wir auf über 10 Millionen Kubikmeter Material, das im Irakkrieg in die Luft gesprengt wurde. Zu den Klimafolgen von Kriegen gibt es bisher, sicher wegen der brisanten Interessenlage, keine verlässlichen Untersuchungen. Auch das Pariser Klimaschutzabkommen hat bisher Untersuchungen dazu weitgehend ausgeklammert, das soll auch mit Konditionen der finanzierenden Quellen zusammenhängen. Es gibt nur wenige Forschergruppen, die sich mit dem Thema befassen, wie z.B. die IMCCS, ein internationales meist aus ehemaligen Militärs 2019 in Den Haag gebildetes Network mit dem Ziel „to anticipate, analyze and address the security risks of climate change“. Die Gruppe IMCCS hat auch auf der Münchner Sicherheitskonferenzen Reports vorgelegt, sie empfiehlt, beginnend mit dem Spritverbrauch, alle militärischen Aktionen auf ihre Klimarelevanz abzuklopfen, eine Empfehlung, die in München keine besondere Beachtung fand. „The Expert Group of the IMCCS consists of the Center for Climate and Security (CCS), an Institute of the Council on Strategic Risks (CSR), the French Institute for International and Strategic Affairs (IRIS), the Hague Centre for Strategic Studies (HCSS) and the Planetary Security Initiative of the Netherlands Institute of International Relations (Clingendael)“ (IMCCS, 2020). Die Experten kommen aus 32 Ländern, eine Beteiligung von Experten aus Deutschland wird nicht erwähnt. Die niederländische Gruppe um den Klimaforscher Lennard De Klerk beklagt, dass sich mit dem ökologischen Fußabdruck von Kriegen bisher noch kaum jemand beschäftigt hat (s. z.B. ZDF-heute, 7.6.2023). Eine

<sup>3</sup> 1 kT (Kilotonne TNT)  $\approx$  1,162 GWh, <https://de.wikipedia.org/wiki/TNT-%C3%84quivalent>

Untersuchung durch sein internationales Forschungsteam kam nun zu dem Schluss, dass allein im ersten Jahr des Ukrainekriegs rund 120 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen-Äquivalente freigesetzt wurden – das entspricht dem jährlichen Treibhausgasausstoß eines mittelgroßen europäischen Landes wie Belgien. Dabei kam ein Großteil durch den Spritverbrauch russischer und ukrainischer Truppen zustande. Ähnlich hohe Emissionen entstanden De Klerk und seinen Kollegen zufolge auch durch kriegsbedingte Feuer. Den größten Teil der Emissionen – nämlich rund 50 Millionen Tonnen – veranschlagt die Berechnung für den Wiederaufbau nach dem Krieg, wenn Kraftwerke, Industrie und Gebäude neu errichtet werden müssen. Der Bausektor, in dem viel Beton verarbeitet wird, gehört generell zu jenen Sektoren mit einem sehr hohen Ausstoß an Treibhausgasen, siehe Abschnitt 2. Eine andere internationale Organisation, „Scientists for Global Responsibility“, die von dem Physiker/Mathematiker Stuart Parkinson geleitet wird, versucht schon seit 2003, der Rolle des Militärs für die Klimakrise auf den Grund zu gehen – und stößt dabei immer wieder auf riesige Lücken in den Daten. Die meisten sind vertraulich, weil von militärischer Relevanz (Parkinson, 2003).

Unsere bisherigen groben Abschätzungen zeigen, dass die Folgen der Kriege, die allein in diesem Jahrhundert geführt wurden, von Kosovo, Syrien, Libyen, Irak, Afghanistan bis zur Ukraine in der Summe über Klimaschäden in der Größenordnung der Tambora-Eruption geführt haben könnten. Es ist eigentlich unverantwortlich, dass dieser stark klimarelevante Faktor in den wissenschaftlichen, journalistischen und politischen Diskussionen unserer Tage gegenüber zweitrangigen Faktoren fast ganz vernachlässigt wird. In der modernen Gesellschaft wird seit einigen Jahrhunderten Krieg mit Hilfe von Granaten und Bomben geführt, die mit Einsatz von Explosivstoffen arbeiten. Wir möchten hier, Lutz-Günther Fleischers Argumenten folgend, einige Bemerkungen machen, da dieses Thema als Tabuthema gilt. Man kann das Ausweichen vor diesem Thema schwer verstehen, da ein erheblicher Teil des in diesem Jahrhundert freigesetzten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes auf geografisch nahe Kriege im Irak, Libyen, Kosovo und jetzt in der Ukraine zurückgeht.

Der Weltklimarat, d.h. das IPCC, das „Intergovernmental Panel on Climate Change“ als „United Nations body for assessing the science related to climate change“, macht keine genauen Angaben über den Einfluss von Kriegen auf das Klima. Man kann sich wundern, dass einer der wichtigsten Faktoren ausgeklammert wurde. Dem Vernehmen nach haben die größten Geldgeber dieses Gremiums, das aus Spitzenwissenschaftlern besteht, die sich regelmäßig an schönsten Stellen dieser Erde treffen, die Finanzierung von der Bedingung abhängig gemacht, dass das Thema Kriegsfolgen nicht behandelt wird. Ein Schelm, wer Böses dabei denkt. Wir wollen hier auf dieses Problem von ethischen Dimensionen solcher Selbstbeschränkungen nicht weiter eingehen, mögen sich die verantwortlichen Klimaforscher dazu äußern. Unsere Untersuchungen werden nur von der Leibniz-Sozietät gefördert, die keine Bedingungen stellt, und wir müssen daher keine Probleme ausklammern.

Man erfährt im Bericht des IPSS-Panels von 2022, dass „270 authors from 67 countries assessed the impacts of climate change on ecosystems and human communities at global and regional levels“ (IPCC, 2022). Wir konnten bisher nur den neuen Report „Climate Change 2022: Impacts, Implementation and Vulnerability“ durchsehen. Hierbei handelt es sich inzwischen um ein gigantisches Forschungsprojekt. Leider werden aber viele Fragen, unter anderem nach den klimatischen Folgen von Kriegen, weder gestellt noch untersucht. Wenn man den Bericht des Panel 2022 liest, erfährt man viel über mögliche Bedrohungen in mehreren Szenarien. Aber Zahlen zu den eigentlichen naturwissenschaftlichen Ursachen und Risiken und in welchem Umfang bedeutende Quellen, wie z.B. die Bauindustrie, Detonationen und Kriege, beitragen, muss man suchen. Nach der Auffassung von vielen Kollegen der Leibniz-Sozietät gebietet die Verantwortung der Wissenschaft, gerade solche Fragen in den Blick zu nehmen, für die keine interessengeleitete starke Finanzierung zur

Verfügung steht. Von unserem physikalisch-chemischen, möglicherweise naiven Standpunkt aus gesehen müssen die großen Quellen von Klimazerstörung besonders von unabhängiger Seite diskutiert werden.

*Grundsätzlich ist zum Thema Klimaeffekte von Explosionen festzustellen:* In Explosivstoffen, wie sie in Granaten und Bomben verbaut werden, sind besonders konzentrierte chemische Energien enthalten. An erster Stelle unter den Umweltsünden, welche Explosionen auslösen, steht vom physikalisch-chemischen Standpunkt aus gesehen die irreversible Umwandlung von hochwertiger chemischer in mechanische Energie, die Zerstörung von festen Strukturen und letztlich die Erzeugung von zerstreuter nutzloser Wärme und damit Entropieproduktion. Das, was eine einzelne explodierende Granate anrichtet, ist vom Standpunkt des Klimas aus gesehen eine Katastrophe. Den Schaden in Geld kann man ermessen, wenn ein Haus zerstört wird, der Wiederaufbau und die Restaurierung aller sachlichen Werte kann man mit etwa einer Million US-Dollar ganz grob veranschlagen, das angerichtete menschliche Leid ist natürlich so nicht zu ermessen, aber wohl der Schaden für die Umwelt. Schätzungen ergeben, dass bei gegenwärtigen Kriegshandlungen in der Ukraine etwa 1 Million Granaten oder Bomben im Jahr eingesetzt werden. Wenn jeder Explosivkörper ein Haus zerstört, so ist eine Zerstörung von ca. 1 Milliarde Dollar anzusetzen. Der finanzielle Schaden kann hier auch nicht unser Gegenstand sein, wohl aber die angerichteten Klimaschäden durch CO<sub>2</sub>-Ausstoß, die Wärmeproduktion und die Zerstörung von Festkörperstrukturen. Darauf wurde bereits in einer der letzten Arbeiten von Lutz-Günther Fleischer hingewiesen.

Der klimatische Schaden, den eine explodierte Granate/Bombe anrichtet, ist nicht in erster Linie durch den unmittelbaren CO<sub>2</sub>-Ausstoß gegeben. Der ist auch erheblich, aber nur der kleinste Teil des Schadens. In den Klima-Schaden sind alle Verluste einzubeziehen, die durch die Zerstörung, die nutzlose Erwärmung der Atmosphäre und den Aufwand einer Wiedererrichtung aufzuwenden sind.

Der Klimaschaden durch Zerstörung eines Hauses ist viel größer als der Aufwand für die Wiedererrichtung des Hauses. Einige Fragen, die noch einer genaueren Untersuchung bedürfen, sind u.a. (Plath u. Hass, 2023b):

- Welche Quellen tragen bei Kriegs-Aktionen außerdem zur CO<sub>2</sub>-Produktion bei?
- Wie wirkt sich die Staubentwicklung aus, wie hoch gelangt der Staub in die Atmosphäre und wie wird er abgebaut?

Der Tambora-Ausbruch hatte fast 1 Milliarde Kubikmeter Material in die Atmosphäre geschleudert und eine erhebliche, über mehrere Jahre nachweisbare Klimaverschlechterung zur Folge gehabt. Ob die extremen „Kriegswinter“ am Ende des 2. Weltkriegs durch diesen selbst bedingt waren, ist eine offene Frage. Der gegenwärtige Krieg im Osten und Süden der Ukraine erreicht zurzeit diese Dimension noch nicht, hat aber das Potential, sie noch zu übertreffen. Die Perspektiven sind also rabenschwarz, und da die negativen Folgen des Ukrainekriegs auf das Klima sich zu denen aus den erdhistorisch erst vor kurzer Zeit beendeten Kriegen im Kosovo, im Irak, in Syrien und Afghanistan summieren, gibt es gute Gründe, sich um die Perspektive des Erdklimas ernsthafte Sorgen zu machen, wenn es nicht zu einem Moratorium kommt, das den Einsatz von Sprengstoffen in Kriegen verbietet (Ebeling u. Feistel, 2017a).

## 5. Chemisch – elektrische Umwandlungen

Wie wir schon erwähnt haben, ist die Energiespeicherung in Batterien nichts anderes als eine spezielle chemische Speichermethode für elektrische Energie, die für die moderne Gesellschaft von zentraler Bedeutung ist. Elektrochemische Batterien und besonders Lithium-Batterien sind heutzutage die häufigsten wieder aufladbaren Batterien der

Konsumelektronik, und die Nutzung in der Autoindustrie schreitet immer weiter voran. Auch die Nutzung von Brennstoffzellen hat eine große Perspektive. Modelle und Simulationen haben eine große Bedeutung für die systematische Verbesserung dieser Systeme und die Optimierung ihrer Effizienz (Ebeling u. Feistel, 2017b; Landstorfer u. Heida, 2023). Brennstoffzellen sind Geräte, die chemische unmittelbar in elektrische Energie umwandeln. Typische Daten für den Wirkungsgrad (Electrical Efficiency) liegen zwischen 35 und 60 Prozent (Meghilef u.a., 2012). Im Unterschied zu Brennstoffzellen haben wir es bei Batterien mit einem geschlossenen Zyklus zu tun: In der ersten Hälfte des Zyklus wird elektrische Energie in chemische Energie verwandelt, die in der zweiten Hälfte wieder zurück in elektrische Energie umgewandelt wird.

Ein Problem, das erst kürzlich in das öffentliche Bewusstsein gerückt ist, ist der Umgang mit alternden Batterien (Landstorfer u. Heida, 2023; Hass u. Plath, 2023). Es ist schon lange bekannt, dass Batterien altern, dass ihr Wirkungsgrad immer schlechter wird und dass sie schließlich ganz versagen. Während aber jede traditionelle Hausfrau der Frage der Lebensdauer einer Haushaltsmaschine die primäre Aufmerksamkeit widmet, ist das Problem der Lebensdauer von Batterien bisher nur selten untersucht worden. Nun aber ist bei der Elektromobilität das Problem der Alterung von Speicherbatterien in das öffentliche Bewusstsein getreten. Lange Zeit wurde nur die Frage der Reichweite einer Ladung betrachtet sowie das Problem der Verfügbarkeit von Ladestationen, wobei besonders die sogenannte Schnellladung als Konkurrenz zur Betankung von Benzin- oder Dieseltgetriebenen Autos in den Vordergrund trat. Die Problematik des Alterns und der Reparaturanfälligkeit gelangte erst vor kurzer Zeit in das Bewusstsein der Öffentlichkeit, so etwa die Frage nach der Korrelation zwischen der Batteriegesundheit (State-of-Health, SoH) der Antriebsbatterien von Elektroautos und ihrem Schnellladeanteil. Die Analyse zeigt, dass die Batteriegesundheit bei Fahrzeugen mit einer Laufleistung von 180 000 bis 200 000 Kilometern in Abhängigkeit von ihrem Schnellladeanteil viel stärker abnimmt als dies bei Fahrzeugen ohne Schnellladeanteil der Fall ist. Es gibt auch Hinweise darauf, dass die Batteriepakete moderner Elektroautos kaum reparabel sind, d.h. der teuerste Teil des Autos muss nach einem Unfall verschrottet werden. Somit beschäftigt die Frage, was mit dem teuersten Bauteil eines E-Autos nach einem Unfall passiert, immer mehr Kunden, Werkstätten und Versicherer. Wir sind der Auffassung, dass es an der Zeit ist, solche Fragen mit dem nüchternen Verstand von Ingenieuren und Hausfrauen anzugehen und nicht einseitig politisch zu betrachten. Die Lebensdauer und die Reparaturanfälligkeit von Automobilen ist eine ebenso wichtige Frage, besonders für den normalen Nutzer, wie diese Frage für die Maschinen im Haushalt ist.

Man braucht hier pragmatische und auf Erfahrung begründete Lösungen und nicht nur gut gemeinte Prognosen hoch bezahlter Experten. Viele ihrer Expertisen beruhen offenbar nicht auf eigenen Experimenten und eigenen Erfahrungen, sondern nur auf die Auswertung fremder „Studien“, die selten genau lokalisiert bzw. nur ungenau zitiert werden, etwa „kürzlich wurde in den USA in einer Studie gezeigt“. Das gilt in der Wissenschaft als unseriös!

## 6. Zu Problemen der stofflichen Basis und zu natürlichen Energiequellen

Große Teile unserer Gesellschaft und besonders Presse und Fernsehen orientieren fast ausschließlich auf Wasserstoff, der ohne Zweifel unikale Eigenschaften besitzt und große Chancen eröffnet, wie unisono ohne neue Erkenntnisse wiederholt wird. Wasserstoff wird als Hoffnungs-Energieträger der Zukunft gehandelt. In der Chemie gehört er zu den essenziellen Rohstoffen. In den Anlagen des Verbundstandorts der BASF in Ludwigshafen werden im Jahr 250 000 Tonnen benötigt; global braucht der Konzern 1 Million Tonnen jährlich. Das Problem: Bei der Herstellung entsteht auch viel Kohlendioxid. Die Autoren



dieser Studie können Hunderte eigener wissenschaftlicher Arbeiten vorweisen, in denen Probleme von Wasserstoff behandelt werden. Sie wissen also aus eigener Erfahrung und nicht nur aus anonymen Quellen, wovon sie reden, und meinen, man sollte auch hier immer sehr genau prüfen, bevor eine einseitige Festlegung erfolgt. Wasserstoff ist im Gebrauch mit großen Sicherheitsproblemen verbunden, die man nicht ignorieren darf. Wasserstoff ist extrem flüchtig, schwer einzulagern und zu leiten; in fast in allen Mischungsverhältnissen mit Luft ist er hoch explosiv. Diese Eigenschaften stellen extreme Anforderungen an die Sicherheitstechnik, und das dürfte eine Nutzung z.B. in normalen Haushalten wohl noch lange Zeit ausschließen. Wer möchte mit seiner Familie in einem Haus leben oder in einem Auto fahren, das mindesten zeh- oder hundertmal so explosiv ist wie Haushaltsgas oder Benzin. Es ist u.E. verantwortungslos, diese gefährlichen Eigenschaften einfach zu verschweigen oder zu ignorieren. Auch stellt die Leitung von Wasserstoff durch Pipelines ein gewisses Risiko für Ansiedlungen in der Umgebung dar. Es liegt aus diesen Gründen nahe, den Wasserstoff für den Transport vom Erzeuger zum Nutzer in einer stabilen und weniger explosiven Form zu binden. Dafür sind viele Varianten in der Diskussion und in technischer Erprobung und es gibt noch keine ausgereiften Lösungen. Dabei bieten sich erst einmal auch bereits erprobte Technologien an, wie die Nutzung von Methan  $\text{CH}_4$  oder Propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  oder ähnlichen Kohlenwasserstoffen, weil es bereits eine ausgereifte Technik der Nutzung von Propan für Antriebs- und Heizungszwecke gibt. Damit würden die erheblichen Kosten für die Entwicklung neuer Technologien wegfallen, allerdings bleibt das Problem weitgehend ungelöst, wie das bei der Nutzung noch entstehende  $\text{CO}_2$  gebunden und eingelagert werden kann.

In den letzten Jahren wird eine ganz andere neue Technologie intensiv erforscht, die Ammoniak-Energetik. Wir wissen, dass unser Mitglied Fritz Haber seit 1904 die katalytische Bindung von Wasserstoff  $\text{H}_2$  und Stickstoff  $\text{N}_2$  zu Ammoniak  $\text{NH}_3$  erforschte, gemeinsam mit Bosch das Haber-Bosch-Verfahren entwickelte und für diese bedeutsame Erfindung mit dem Nobelpreis des Jahres 1918 ausgezeichnet wurde. Eine realistische Gesamtbilanz der Ammoniak-Energetik sieht zunächst nicht besonders günstig 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 (Fricke, 2018). Dies entspricht einer Effizienz für die Herstellung von 63 %. Nach dieser Abschätzung ist der Heizwert von flüssigem  $\text{NH}_3$  nur etwa halb so hoch wie der von Benzin oder Diesel und etwa ein Sechstel so groß wie jener von flüssigem Wasserstoff. Von Vorteil ist, dass auch diese Technologie schon erprobt ist, denn Ammoniak wurde schon 1872 als Antrieb für Straßenbahnen in New Orleans verwendet. Auch die Autoindustrie hat schon mit Ammoniak experimentiert. In den 40er Jahren fuhren belgische Busse mit Ammoniak und 1981 wurde in den USA ein Chevrolet Impala mit Ammoniak betrieben (Fricke, 2018). Bei dieser Nutzung wird in der Regel flüssiges Ammoniak verwendet. Das Phasendiagramm von Ammoniak 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. Unter 9 bar Druck lässt es sich schon bei 20°C verflüssigen. Allerdings ist Ammoniak giftig, aber sehr gut warnfähig. Menschen riechen Ammoniak bereits in geringsten, ungefährlichen Konzentrationen. Ammoniak lässt sich auch gut in Brennstoffzellen herstellen: Dabei wird an der mit einem Katalysator beschichteten Anode Wasser in Sauerstoff,  $\text{H}^+$ -Ionen und Elektronen gespalten. 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  $\text{NH}_3$  reagieren können (Fricke, 2018). Diese Eigenschaften und die

Tatsache, dass bei einer Verbrennung nur Wasser und Stickstoff entstehen, macht Ammoniak zu einem erstrangigen Kandidaten für eine CO<sub>2</sub>-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 NH<sub>3</sub>-Brennstoffzelle zur Netzstabilisierung in elektrische Energie umgewandelt werden. Das ist zumindest ein perspektivreicher Weg in eine zukünftige CO<sub>2</sub>-freie Energiewirtschaft, wenn auch einige technisch-technologische Probleme der Ammoniak-Energetik noch offen sind. Insbesondere erfordern die effiziente Gewinnung von Ammoniak als Gas sowie die Nutzung und energetische Verwertung von Ammoniak in einer Brennstoffzelle die Entwicklung adaptierter und neuer Technologien. Dabei verstehen wir unter Technologie sowohl die reale Lösung im prozessualen Zusammenwirken von Menschen, der Technik und dem Arbeitsgegenstand, als auch das effektive Methoden-Arsenal zum Erreichen eines vorgegebenen Ziels in einem definierten Anwendungsbereich.

Wir schließen hier noch eine Diskussion natürlicher Quellen nutzbarer Energie an. Dabei diskutieren wir nur solche Quellen nutzbarer Energie, die nach unserer Auffassung noch nicht voll ausgeschöpft sind. Solche Standardquellen nutzbarer Energie wie die Wasserkraft müssen wir hier nicht genauer diskutieren. Wir verweisen nur darauf, dass auch diese Quelle erneuerbarer Energie nicht vollständig ausgeschöpft ist. Es gab in den 50er und 60er Jahren einen Boom beim Bau von Wasserkraftwerken und Pumpspeichieranlagen, heute hört man kaum noch etwas davon, obwohl Pumpspeicher die mit Abstand effektivste Speicherung von Elektroenergie ermöglicht. Im Prinzip kann man in jeder hügeligen Landschaft, ja sogar mit künstlichen Hügeln, effektive Pumpspeicher bauen. Im Nordosten von Berlin gibt es die Arkenberge, gebildet aus riesigen Bergen aus Müll und Bauabfall, über deren Nutzung seit Jahren heftig gestritten wird. Auch hier könnte ein Pumpspeicherkraftwerk entstehen, das die erheblichen Schwankungen in der Produktion von Windenergie und Solarenergie auszugleichen vermag und das mit hoher Effektivität und vergleichsweise kleinen Kosten.

Zu den noch sehr wenig ausgeschöpften Quellen zählen wir die in der Umwelt enthaltenen Reserven in Gradienten von Wärme und der in Gradienten von Konzentration enthaltenen Energie. Wir können dem allgemeinen Prinzip folgen, dass fast jede Form von Gradienten von Temperatur- und Stoffdichte nutzbar ist. Die Nutzung von Gradienten der Temperatur ist schon Standard, ein bekanntes Beispiel sind die Wärmepumpen. Hier wird im Prinzip Wärme durch Einsatz elektrischer Energie auf ein höheres Temperatur-Niveau gepumpt, was einer umgekehrten Carnotmaschine entspricht. Die Umkehrung einer sogenannten Wärmekraftmaschine ist an enge thermodynamische Grenzen für den Wirkungsgrad geknüpft und ein durchaus komplexer Vorgang, dessen Umsetzung auch reparaturanfällig ist. Wir sind daher der Auffassung, dass es eine bessere Strategie ist, Wärmepumpen zu zentralisieren, indem man für Gemeinden und Städte größere Anlagen mit ständiger Aufsicht und Reparatur baut, wie das etwa in der dänischen Stadt Esbjerg erfolgt ist. Zentrale Lösungen haben gegenüber den Wärmepumpen für einzelne Häuser den Vorteil, besser kontrollierbar und daher weniger reparaturanfällig zu sein und auch schneller auf technischen Fortschritt reagieren zu können. Noch unzureichend werden bisher vorhandene Gradienten in der Natur genutzt, wir denken etwa an die Temperaturunterschiede zwischen großen Gewässern wie Ost- und Nordsee, die einige Grad betragen. Noch weitgehend ungenutzt sind auch die Konzentrationsunterschiede, die Differenzen des Salzgehaltes, der sogenannten Salinität zwischen Ost- und Nordsee sowie zwischen den Flüssen und Seen. Die mögliche Nutzung beruht darauf, dass sich zwischen zwei durch eine Wand getrennten Flüssigkeiten mit verschiedener Salzkonzentration eine Spannung ausbildet, die sogenannte Nernst-Spannung, die nutzbar ist (Yin Yip u.a., 2016).

Wie in der Einleitung betont, besteht unser Ziel nicht darin, hier technologisch ausgereifte Lösungen zu entwickeln, wir wollen lediglich auf die naturwissenschaftlich möglichen und günstigen Lösungen hinweisen. So könnten wir uns in einem hügeligen Gelände in Schleswig etwa zwischen Niebüll und Flensburg oder in Dänemark zwischen Hoyer und Apenrade ein Rückhaltebecken für Meerwasser vorstellen, das eine vielseitige Nutzung ermöglicht:

1. Das Becken könnte als Pumpspeicherkraftwerk für die reichlich produzierte Windenergie dienen.
2. Die Temperaturdifferenz zwischen Ostsee- und Nordsee-Wasser, die etwa 2 Grad beträgt, könnte als Heizkraftwerk für umliegende Städte und Gemeinden genutzt werden.
3. Der Unterschied der Salinität von Ost- und Nordsee könnte über die Nernst-Spannung für die Erzeugung von Strom genutzt werden.
4. Wärmepumpen, die insbesondere im Winter das Meer abkühlen, verfügen über ein extrem großes Reservoir an Wärme und würden sogar der klimatischen Erwärmung des Meeres entgegenwirken (Dutheil u.a., 2022).

Auch an anderen Stellen könnten ähnliche Modelle Anwendung finden, so etwa auf dem Darß bei Dierhagen oder auf Usedom. Wir sind uns durchaus bewusst, dass solche Projekte in Urlaubsregionen nicht auf Begeisterung stoßen werden. Man muss aber realisieren, dass man allein durch Erweiterung der Urlaubsregionen das Klima der Erde nicht retten kann. Alle müssen dazu beitragen und gegebenenfalls auch andere Wünsche zurückstecken. Außerdem bietet eine Erweiterung der Grünflächen und Wasserstaubecken auch neue Erholungsmöglichkeiten und neue Chancen für die Touristik.

## 7. Zur Frage allgemeiner Strategien zur Klimasicherung

Die Diskussion der allgemeinen Fragen von Energiespeicherung und Transport fassen wir wie folgt zusammen. In der Regel sind die Orte, wo hochwertige Energie, z.B. in Form von aufgestautem Wasser, Sonnen- oder Windenergie, weit von den Orten entfernt, wo größere Mengen hochwertiger Energie benötigt werden. In Deutschland stehen zum Beispiel die meisten leistungsfähigen Windräder an der Nord- und Ostsee, siehe unsere Tabelle 1, aber die größten Verbrauchszentren sind in Bayern, Sachsen und Reinland-Pfalz angesiedelt. Wie kann man Energie effizient, d.h. verlustfrei, über viele 100 km fortleiten? Heute wird häufig verkündet, dass Wasserstoff der ideale Energieträger sei, da seine Verbrennung nur Wasser erzeugt und somit absolut emissionsfrei bleibt. Aber auch diese Frage muss u.E. noch diskutiert und von Ingenieuren im Detail durchgerechnet werden. Man sollte die wesentlichen Nachteile von reinem Wasserstoff nicht unterschätzen und insbesondere seine Flüchtigkeit und Explosivität ohne Vorbelastung durch Ideologie und Vorurteile prüfen. Wir sind hier von den Überlegungen von Lutz-Günther Fleischer ausgegangen, die letztlich zurückgingen auf den Appell der Präsidentin der Leibniz-Sozietät, die Verantwortung für eine bessere Welt ins Zentrum unserer wissenschaftlichen Arbeit zu stellen. Wir wissen, dass eine tragfähige Beurteilung und effiziente Einflussnahme nicht durch einzelne Wissenschaftler möglich ist, und sind der Auffassung, dass nur interdisziplinäre Teams aus relevanten Wissenschaftsgebieten, die ohne Vorurteile herangehen, dazu in der Lage sind. Dazu soll auch dieser Beitrag dienen. Eine unserer Schlussfolgerungen lautet, dass Prognosen der Klimaentwicklung und ihrer Folgen eine umfassende Einbeziehung aller wichtigen Faktoren, auch der schwer vorhersehbaren, erfordern. Demgemäß sollte eine verantwortungsvolle Politik immer ein breites Möglichkeitsfeld abdecken, auch auf dramatische klimatische Ereignisse vorbereitet sein und nicht einseitigen Prognosen oder Wunschdenken folgen. Verantwortungsvolle Planung sollte immer ein breites Möglichkeitsfeld unter Berücksichtigung der günstigsten und ungünstigsten Varianten einbeziehen und Entscheidungen nicht nur auf Prognosen von Mittelwerten

gründen. In der gegenwärtigen Zeit ist die Hauptstrategie zur Bekämpfung der Folgen des Klimawandels, die von den Regierungen und Parlamenten der entwickelten Industriestaaten (G7) ausgearbeitet wurde, die Steuerung durch CO<sub>2</sub>-Preise. Es ist anzumerken, dass die entscheidenden Gremien im Wesentlichen aus Juristen und Wirtschaftsfachleuten bestehen und dass sie nicht mehr als 10% der Weltbevölkerung vertreten. Die Idee besteht darin, durch Anhebung der Kosten für CO<sub>2</sub>-intensive Produktionen diese auszubremsen und damit letztendlich den Gesamtausstoß drastisch zu begrenzen. Das ist eine planwirtschaftliche Maßnahme und es gibt eigentlich keinen empirischen Beweis, dass dieser Plan funktioniert, weil es eine solche dramatische Situation in der Weltwirtschaft noch nicht gegeben hat. Wir sehen auch keinen Beweis, dass Planwirtschaft je nachhaltig funktioniert hätte. Als Naturwissenschaftler meinen wir, es ist riskant, in einer bedrohlichen Situation alles auf eine Karte, die Preispolitik, zu setzen. Wer kann garantieren, dass das die richtige Strategie ist? Wir würden raten, dazu parallel auch eine von der Natur erfundene Strategie zu nutzen, die nachgewiesenermaßen funktioniert hat und die Existenz hochorganisierter Lebewesen auf der Erde erst ermöglicht hat. Was wir meinen, ist die kontinuierliche Entnahme und Einlagerung von CO<sub>2</sub> in den Ozeanen und in der festen Erdkruste. Noch vor etwa 2 Milliarden Jahren hatte die Erde eine Atmosphäre, in der CO<sub>2</sub> dominierte und in der ein höheres Leben unmöglich war. Erst nachdem die Photosynthese erfunden worden war und es einen permanenten Entzug von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und seine Bindung in der Kruste und den Ozeanen gab, entstand die heutige lebensfreundliche Atmosphäre (Ebeling u. Feistel, 1994).

Diese Strategie hat erfolgreich funktioniert und es ist nicht nachzuvollziehen, dass es seit 2012 in Deutschland Gesetze gibt, die die CO<sub>2</sub>-Einlagerung zwar nicht verbieten, aber doch so begrenzen, dass seither alle Firmen, die solche Technologien entwickeln, ins Ausland wie die USA und Norwegen abgewandert sind. Ein Beispiel aus der Zementindustrie, das Unternehmen Heidelberg Materials (FOCUS, 17.06.2023), haben wir schon genannt. Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist die CO<sub>2</sub>-Einlagerung derzeit das wirksamste Mittel, um einen weiteren Anstieg des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre zu stoppen (Smith u.a., 2022). Der letzte Weltklimabericht hat deutlich gemacht, dass die Weltgemeinschaft deutlich mehr CO<sub>2</sub> einspeichern muss, um die Ziele des Pariser Klimaabkommens noch zu erreichen. Das heißt: Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß muss nicht nur verringert werden, der Atmosphäre muss auch gezielt CO<sub>2</sub> entzogen werden. Diese Verfahren werden CDR (Carbon Dioxide Removal) oder CDS (Carbon Capture and Storage) genannt. Gerade wurde unter Federführung der Oxford Universität ein Bericht zum globalen Stand der CO<sub>2</sub>-Entnahmen aus der Atmosphäre veröffentlicht (Smith u.a., 2022). Die Ergebnisse der Analyse zeigen deutlich: Alle untersuchten Staaten, auch Deutschland, hinken in Sachen CDR/CCS deutlich hinterher. Inzwischen gibt es auch eine BMBF-Fördermaßnahme, *CDRterra*, in der politische, ökologische, technische und gesellschaftliche Fragen zu CDR-Methoden erforscht werden (BMBF, 2023). Sie geht davon aus, dass es auch in Zukunft unvermeidbare Emissionen zum Beispiel aus Landwirtschaft, Industrie und Abfallwirtschaft geben wird. Die angestrebte Treibhausgasneutralität beschreibt daher ein Gleichgewicht zwischen den Quellen und Senken der Treibhausgase. Besonderer Forschungsbedarf besteht in der Frage, in wie weit die Senken von Treibhausgasen aktiv durch den Menschen vergrößert oder ergänzt werden können. Ziel der CDR-Fördermaßnahme ist es, durch die Erforschung von Methoden zur Entnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre die Wissensgrundlagen für forschungs- und klimapolitische Entscheidungen der Bundesregierung zu verbessern.

Pro Jahr werden bisher weltweit nur rund 2 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> aktiv aus der Atmosphäre entnommen – das sei viel zu wenig gegenüber ca. 18 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen, heißt es im Bericht von (Smith u.a., 2022). Leider ist am „Hinken“ der BRD auch das schon erwähnte Berliner Gesetz mitschuldig: Das bestehende

„Kohlendioxidspeicherungsgesetz“ stammt aus dem Jahre 2012 und „regelt“ die Erforschung von Speichertechnologien in unterirdischen Gesteinsschichten. Es ist höchste Zeit, eine neue Gesetzeslage so zu gestalten, dass die deutschen Firmen, die CDR erforschten und in die USA abgewandert sind, wieder zurückkommen und Deutschland wieder zurück auf einen Spitzenplatz bringen. Immerhin gibt es inzwischen die bereits erwähnte neue Fördermaßnahme, *CDRterra*, des Bundesministeriums für Forschung und Wissenschaft zur Erforschung terrestrischer CO<sub>2</sub>-Entnahmefethoden (BMBF, 2023). Aus unserer Sicht liegen dazu im Ausland schon genügend Forschungsergebnisse vor und auch der 6. Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC bestätigt (IPCC, 2022): „Für eine Begrenzung des Anstiegs der globalen Durchschnittstemperatur auf 1,5 °C oder 2 °C werden neben der drastischen Reduktion von Treibhausgasemissionen auch sogenannte „negative Emissionen“ benötigt. Negative Emissionen bedeuten das aktive Entziehen von CO<sub>2</sub> (*Carbon Dioxide Removal, CDR*) aus der Atmosphäre und dessen langfristige Speicherung. Als Schlussfolgerung fördert das BMBF Forschungsprojekte in Richtung CDR mit insgesamt rund 21 Millionen Euro. Das reicht aus unserer Sicht nicht aus, denn eine Umsetzung ist kaum vor eine Dekade in Sicht.

Auch die deutsche Industrie muss auf diesem Gebiet deutlich innovativer werden, auch wenn Umweltverbände schon jetzt mit Klagen gedroht haben. Europäische Länder wie Norwegen sind da schon weiter, indem sie die Speicherung von CO<sub>2</sub> am Meeresgrund fördern und ein Milliardenprojekt für eine Kooperation mit dem Rostocker Hafen vorgeschlagen haben, das aber scheinbar in Mecklenburg-Vorpommern auf wenig Resonanz stößt. Wer hier noch ungelöste Probleme sieht, sollte sich einfach an Fakten orientieren: Im Meer ist jetzt schon etwa fünfzig Mal so viel Kohlenstoff gelöst wie in der Atmosphäre enthalten ist. Dieser potenzielle Speicher ist riesig, nicht ausgeschöpft und unproblematisch; schon eine relativ kleine Verschiebung zwischen Ozean und Atmosphäre würde entscheidenden Einfluss auf das Klima haben. Die durch gelöstes CO<sub>2</sub> bedingte Verringerung des pH-Werts („Versauerung“ des Ozeans) wird bisher weitgehend durch den basischen Charakter des gelösten Meersalzes gepuffert (Marion u.a., 2011; Dickson u.a., 2016; Le Quéré u.a., 2018). Jeder normale Mensch hat die Erfahrung gemacht, dass Sprudel kein gefährliches Getränk und keineswegs giftig ist, er sollte daher die Behauptung, CO<sub>2</sub>-Einlagerung wäre nicht erprobt und „gefährlich“, ins Reich der Märchen verweisen. Leider werden solche Märchen gerade von Kreisen verbreitet, die vorgeben, das Klima retten zu wollen, in Wirklichkeit aber nur grundsätzlich jede Innovation ablehnen. Das besonders in norddeutschen Regionen verbreitete traditionelle Prinzip, „Was wir schon immer so gemacht haben, sollten wir beibehalten“, hilft heute nicht weiter!

Wir könnten uns eine Regelung vorstellen, die energieintensiven Betrieben nicht etwa eine Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes vorschreibt, sondern lediglich den Nachweis, dass man der Atmosphäre mehr CO<sub>2</sub> entzieht als man CO<sub>2</sub> ausstößt. Der Betrieb könnte z.B. Anlagen bauen, die mit Hilfe von Sonnen- oder Windenergie CO<sub>2</sub> einlagern, oder er könnte Häuser bauen, die CO<sub>2</sub> binden, oder er könnte Gebiete irgendwo in der Welt aufforsten oder Moore renaturieren. Wir schlagen vor, solche oder ähnliche Maßnahmen den CO<sub>2</sub>-Preisregulierungen ergänzend zur Seite zu stellen und ihre Wirkung auf den Gesamtausstoß zu kontrollieren. Aus unserer Sicht waren die bisherigen Strategien zwar hilfreich, aber in keiner Weise ausreichend und auch nicht überzeugend, wie die bisherigen Auswertungen der Pariser Vereinbarungen zeigen. Danach war die Wirkung der bisherigen Maßnahmen ganz ungenügend und das Erreichen der Ziele rückt immer weiter in die Ferne.

Zu beachten ist auf jeden Fall bei den Feststellungen des Sachstandes, dass das Klima immer auch großen natürlichen Schwankungen unterworfen ist und dass die Schwankungsbreite in der Regel sehr groß ist (Dethloff, 2022). Insofern sollten Strategien nicht primär auf die Gegensteuerung natürlicher Schwankungen, sondern eher auf eine

Anpassung an langfristige Veränderungen gerichtet werden. In der längerfristigen Geschichte der Menschheit war die wichtigste Strategie der Menschen bei dramatischen Klimaschwankungen bisher immer die Völkerwanderung. Auch das ist heute zu bedenken. Die Berliner Akademie der Wissenschaften hatte bei der Erforschung solcher Prozesse eine große Tradition, und weitere Forschungen dazu sollten auch in die Überlegungen einbezogen werden. Vielleicht kann man die heute so heiß diskutierten Wanderungsbewegungen in Europa, die wir beobachten, als den Beginn einer neuen klimabedingten großen Völkerwanderung in der Welt deuten. Es ist nicht ausgeschlossen, dass sich solche Wanderungen auch als eine Strategie für die ferne Zukunft erweisen. Es würde etwa bedeuten, dass immer mehr Menschen von Afrika nach Europa ziehen und dass möglicherweise die Europäer die Küsten des nördlichen Eismeereres erschließen werden, einschließlich der Küsten des nördlichen Eismeereres bis hin an die Beringstraße.

Aus der Sicht einer langfristig orientierten Analyse ist die Klimaentwicklung Teil einer globalen Entwicklung unseres Planeten, die in der Vergangenheit immer sehr starken Schwankungen unterworfen war und das auch weiterhin sein wird. Wir sollten der Illusion entgegentreten, dass die Wissenschaft und die Politik heute alles vorhersagen und alles steuern können und dass alles so bleiben muss, wie es war. Zufällige Faktoren, u.a. Vulkanausbrüche, spielen immer eine Rolle und sind nicht zu vermeiden, im Gegensatz zu Kriegen, die zwar eine ähnliche Wirkung haben, aber durchaus vermeidbar sind. Daher sollten – neben Strategien zur Verringerung negativer Klimafaktoren aus Haushalt, Verkehr, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Industrie – zur Vergrößerung der Photosynthese-Flächen und der Ächtung von Bombenkriegen auch systematisch Strategien der raschen Anpassung an unvorhergesehene Veränderungen entwickelt werden. Wie die Erfahrungen der langen Geschichte der Menschheit zeigen, muss jede menschliche Population immer auf relativ rasche Temperaturänderungen in positiver oder negativer Richtung, auf Änderungen des Spiegels der Ozeane und auf große Wanderungsbewegungen vorbereitet sein. Klagen und lamentieren war da noch niemals hilfreich, sondern rasche Anpassung und effiziente Reaktion.

## 8. Schlussbemerkungen

Zusammenfassend kann man sagen: Die Umwandlung von chemischer in elektrische oder mechanische Energie und vice versa gehört nach wie vor zu den Schlüsselproblemen moderner Technologien. Dazu kommt die Bedeutung dieser Frage für die Beherrschung des Klimawandels und auch, dass auf diesem Felde noch längst nicht alles Relevante erforscht und gesagt worden ist. Was uns besonders wichtig ist: Auch die heute notwendigen Schlussfolgerungen und Entscheidungen sind noch nicht genügend durch physikalisch-chemische Grundlagen abgesichert. Das betrifft zum Beispiel den Einfluss von Meerwasser und Wasserdampf auf die Evolution des Klimas und den Einfluss von Kriegen auf unser Klima. Unter Wissenschaftlern besteht wohl kein Zweifel daran, dass die Herstellung und der Einsatz von Bomben und Granaten wohl die unsinnigste und schädlichste aller Möglichkeiten der Energieumwandlung sind, weil damit nicht nur wertvolle chemische Energie unnütz vergeudet wird, sondern auch in verantwortungsloser Weise eine große Menge von Entropie irreversibel erzeugt wird. Solange Kriege mit Pfeil und Bogen oder mit Pistolen und Gewehren ausgetragen wurden, haben sie dem Klima keinen großen Schaden zufügen können, der heutige Krieg mit Bomben und Granaten schadet dem Weltklima irreversibel, d.h. in niemals gut zu machender Weise, ganz egal in welchem Winkel der Erde er ausgetragen wird; jeder Krieg ist in diesem Sinne ein Weltkrieg geworden. Wir halten es für gerechtfertigt, diese Variante durch internationale Konventionen total verbieten zu lassen. Solange die Beherrschung des Klimawandels zwar in den Reden der Entscheider die erste Stelle einnimmt, aber im Budget die letzte Stelle, wird das Problem ungelöst bleiben. Ein

zentraler Punkt ist es, den Energieverbrauch jedes Erdbewohners im Auge zu behalten und das Wachstum des durchschnittlichen Energieverbrauchs pro Einwohner zu stoppen. In dieser Hinsicht stimmt es bedenklich, dass offenbar mit Unterstützung der Behörden in den letzten Jahren konkrete Angaben zum Verbrauch von Kühlschränken, Fernsehgeräten usw. verschwunden sind und bestenfalls durch kryptische Klasseneinteilungen ersetzt wurden. Wer das bezweifelt, möge in einer Suchmaschine eingeben: Wieviel Watt verbraucht mein Kühlschrank/Fernseher? Die Antwort sind nur Hunderte von Kaufofferten, aber keine konkreten Zahlen! Das kann man nicht tolerieren, denn es muss das Ziel sein, einen persönlichen Verbrauch weit unter 10 kW an wertvoller Energie zu erreichen und keinesfalls weiter zu erhöhen. Zwanzig Seiten Kommentar, von Juristen abgefasst und in 20 Sprachen übersetzt, nützen höchstens dem Gewinn des Konzerns, dem Klima aber weniger als konkrete Zahlen zum Verbrauch in Watt. Ein weiteres unbegrenztes Wachstum im Verbrauch wertvoller Energie und eine Vergrößerung der Schere im Verbrauch zwischen Arm und Reich oder verschiedenen Nationalitäten ist ganz unzulässig und würde letztlich in eine Katastrophe führen. Wir empfehlen auch, in Zukunft jede Einsparung des Verbrauchs an Energie und jede Einlagerung von CO<sub>2</sub>, etwa durch Aufforstung, Brandbekämpfung oder industrielle Verfahren, einem persönlichen Klimakonto gutzuschreiben. Im Übrigen weisen wir darauf hin, dass die Menschheit für das Überleben stets mehrere variable Strategien entwickelt hat. Die von Presse und TV so geliebte Schwarzmalerei mit täglichen Meldungen über Hitzerekorde, Aussterben einer Art und Klimakatastrophen ist mit Sicherheit keine gute Strategie. Statt eine junge Generation zu Depressionen und sinnlosen zerstörerischen Aktionen zu stimulieren, sollte man sie lieber in Richtung aktiver Maßnahmen lenken, die dem Klima helfen. Es wäre besser, wenn junge Menschen nicht von einer Tauchschule im Pazifik träumen würden, sondern von Brandbekämpfung, Pflege von Wäldern und Mooren und anderen Maßnahmen, die dem Klima effektiv helfen. Es hilft auch nicht weiter, wenn viele Experten übertreiben, um mit Horror-Botschaften im TV auftreten zu dürfen und eventuell sogar dafür noch hohe Honorare beziehen. Stattdessen bedarf es verantwortungsvoller, kühler und mit allen Natur- und Geowissenschaften abgestimmter rationaler Überlegung, korrekter Rechnungen und mitunter auch ganz neuer Lösungen für immer neue Probleme und vielleicht auch neuer Träume. Auch unpopuläre Lösungen müssen in Betracht gezogen werden. Wir müssen dabei wieder an die englische Lady denken, die sich beim Untergang der Titanic weigerte, bei Regen ein offenes Boot zu besteigen. Die Tatsache, dass ein Anstieg des Weltverbrauchs an wertvoller Energie von etwa 2,5 Gigawatt in den letzten 2 Jahren offenbar kaum noch jemanden beunruhigt und dass solche bedrohlichen Zahlen hinter Meldungen zu Krieg und Katastrophen an die 2. Stelle getreten sind, gibt wenig Anlass zum gebotenen Optimismus. Man kann nur an das Motto von Ossip K. Flechtheim, dem Begründer der Futurologie, erinnern: „Alle Menschen sitzen heute in einem Boot“.

Im Übrigen unterstützen wir die Idee, dass alle Bewohner dieses Erdballs die gleichen Ansprüche und Rechte auf die beschränkten Ressourcen der Erde haben, aber auch die gleichen Pflichten in Bezug auf den Erhalt lebenswerter Bedingungen. Diese Rechte und Pflichten überall anzuerkennen und durchzusetzen bleibt eine anspruchsvolle Aufgabe der Weltpolitik.

## Bibliographie

- Bender, Michael L. (2013): *Paleoclimate*. Princeton & Oxford: Princeton University Press
- Bertau, Martin/Offermanns, Heribert/Plass, Ludolf/Schmitt, Friedrich/Wernicke, Hans-Jürgen (2014): *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future*. Berlin: Springer.
- BMBF (2023): „CDRterra – Forschungsprogramm zu landbasierten CO<sub>2</sub>-Entnahmemethoden“. Startseite: <https://cdrterra.de/de>.
- Baldini, James U. L./Brown, Richard J./Mawdsley, Natasha (2018): „Evaluating the link between the sulfur-rich Laacher See volcanic eruption and the Younger Dryas climate anomaly“. <https://cp.copernicus.org/articles/14/969/2018/cp-14-969-2018.pdf>.
- Berger, Wolfgang H. (1987/88): Persönliche Kommunikation. Universität Bremen.
- Dethloff, Klaus (2022): *Unberechenbares Klima. Ursachen und Unsicherheiten des Klimawandels*. Berlin: Springer.
- Dickson, Andrew G./Camões, Maria F./Spitzer, Petra/Fisicaro, Paola/Stoica, Daniela/Pawlowicz, Rich/Feistel, Rainer (2016): „Metrological challenges for measurements of key climatological observables. Part 3: Seawater pH“. *Metrologia* 53, R26–R39, <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/1/R26>.
- Dutheil Cyril/Meier, H. E. Markus/Gröger, Matthias/Börgel, Florian (2022): „Warming of Baltic Sea water masses since 1850“. *Clim. Dyn.*: online, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06628-z>.
- Ebeling, Werner/Feistel, Rainer (1994): *Chaos und Kosmos, Prinzipien der Evolution*. Heidelberg: Spektrum-Akademischer Verlag.
- Ebeling, Werner/Feistel, Rainer (2017a): „Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft und Strategien zur Gestaltung der Zukunft“. *Leibniz Online*, Nr. 27. <http://leibnizsozietaet.de/category/publikationen/leibniz-online>.
- Ebeling, Werner/Feistel, Rainer (2017b): „Energy conversion in isothermal nonlinear irreversible processes - struggling for higher efficiency“. *Eur. Phys. J. Special Topics*, 226, 2015–2030; <https://doi.org/10.1140/epjst/e2017-70014-2>.
- Ebeling, Werner/Fleischer, Lutz-Günther (2022): „Theodizee – Klimaproblem und unsere Verantwortung. Gedanken zum Bericht der Präsidentin auf dem Leibniz-Tag“. *Leibniz Online*, Nr. 46.
- Ebeling, Werner/Fleischer, Lutz-Günther (2022): „Zur Verantwortung von Natur- und Technikwissenschaftlern und dem Klimaproblem“. *Leibniz Online*, Nr. 46.
- Ebeling, Werner (22.05.2023): „Klimaschutz und Politik – Mit Naturgesetzen kann man nicht verhandeln. Wie kann man den Klimawandel effektiv bekämpfen?“. *Berliner Zeitung*. <https://www.berliner-zeitung.de/open-source/klimawandel-effektiv-bekaempfen-berliner-experte-physiker-werner-ebeling-klimaschutz-und-politik-mit-naturgesetzen-kann-man-nicht-verhandeln-li.347933>.
- Ellis, Leah D./Badel, Andres F./Chiang, Miki L./Park, Richard J.-Y./Chiang, Yet-Ming (2020): „Toward electrochemical synthesis of cement — An electrolyzer-based process for decarbonating CaCO<sub>3</sub> while producing useful gas streams“. *PNAS*, June 9, 2020, vol. 117, no. 23, 12584–12591; first published September 16, 2019; <https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116>.
- Feistel, Rainer/Ebeling, Werner (2011): *Physics of Self-Organization and Evolution*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Feistel, Rainer/Ebeling, Werner (2016): „Entropy and the Self-Organization of Information and Value“. *Entropy*, 18, 193; <https://doi.org/10.3390/e18050193>.



- Fricke, Jochen (2018): „Ammoniak – Ein idealer Wasserstoffspeicher. Eine interessante Alternative zum Elektroantrieb?“. *Bayern innovativ*. <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/ammoniak-wasserstoffspeicher>.
- Flechtheim, Ossip Kurt (1989): *Ist die Zukunft noch zu retten*. Mit Vorwort von O. Lafontaine. München: Heyne-Verlag (Zitat, S. 222).
- FOCUS Magazin (17.06.2023): „Hightech zur CO2-Entsorgung“. [https://www.focus.de/magazin/archiv/klimaschutz-hightech-zur-co2-entsorgung\\_id\\_196652548.html](https://www.focus.de/magazin/archiv/klimaschutz-hightech-zur-co2-entsorgung_id_196652548.html).
- Haken, Hermann/Plath, Peter Jörg/Ebeling, Werner/Romanovsky, Yuri (2016): *Zur Geschichte der Synergetik und allgemeine Prinzipien der Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft*. Wiesbaden: Springer Spektrum.
- Hass, Ernst-Christoph/Knicker, Katharina/Sydow, Uwe/Schulz, Matthias/Plath, Peter Jörg (2018): „Battery – determination and forecast via Synergetics“. Complexity and Synergetics, hrsg. von S. C. Müller et al. Berlin: Springer, 139–153.
- Hass, Ernst-Christoph/Plath, Peter Jörg (2023): „Optimale Nutzung von alternden Batterien“. Manuskript.
- Holleman, Arnold F./Wiberg, Egon (1960): *Lehrbuch der Anorganischen Chemie*. Berlin: Walter de Gruyter & Co, 413–415.
- IMCCS: International Military Council on Climate and Security, <https://imccs.org>; „World Climate and Security Report, 2020“. <https://imccs.org/report2020/>.
- IPCC: *Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Authors: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/about/authors/>  
Report: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- Klein, Oliver (04.07.2023): „USA prüfen, die Sonne zu verdunkeln“. ZDF, <https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/klima-srm-sonne-verdunklung-100.html>.
- Landstorfer, Manuel/Haida, Martin (2023): „Batterieforschung – Energie effizienter speichern“. *Spektr. d. Wiss.* 8, 72–79.
- Le Quéré, Corinne et al. (2018): „Global Carbon Budget 2017“. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 405–448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.
- Liebe, Sylvaine von/Gutknecht, Bernd-Uwe (2023): „Klimakiller Beton; Beton – Wege zu einer besseren Klimabilanz“. Stand: 06.01.2023. <https://www.ardalpha.de/wissen/umwelt/klima/klimawandel/beton-emissionen-klimafreundlich-bauen-umwelt-loesungen-klimakrise-100.html>, siehe auch: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/energieeffizienz>. Abgerufen: 13.04.2023.
- Marion, Giles M./Millero, Frank J./Camões, Maria F./Spitzer, Petra/Feistel, Rainer/Chen, C.-T. A (2011): „pH of seawater“. *Marine Chemistry*, 126, 89–96, <https://doi.org/doi:10.1016/j.marchem.2011.04.002>.
- Meghilef, Saad/Saidur, Rahman/Safari, Azadeh (2012): „Comparative study of different fuel cell technologies“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 981–989, <https://doi.org/doi:10.1016/j.rser.2011.09.020>.
- ORF.at (05.04.2018): „Vulkan in Japan kommt nicht zur Ruhe“. <https://news2.orf.at/stories/2432943>.
- Parkinson, Stuart/Cottrell, Linsey (2022): „Scientists for Global Responsibility: Estimating the military’s global greenhouse gas emissions“. [https://ceobs.org/wp-content/uploads/2022/11/SGR-CEOBS\\_Estimating\\_Global\\_Military\\_GHG\\_Emissions.pdf](https://ceobs.org/wp-content/uploads/2022/11/SGR-CEOBS_Estimating_Global_Military_GHG_Emissions.pdf).
- Plath, Peter Jörg/Hass, Ernst-Christoph (2023a): „Vorschlag für eine CO2-Emissionsfreie Zementproduktion“. Manuskript.
- Plath, Peter Jörg/Hass, Ernst-Christoph (2023b): „Klima- und Umweltschäden durch Explosivstoffe“. Manuskript.

- Self, Stephen (2006): „The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions“. *Phil. Trans R. Soc. A* 364, 2073–2097.
- Smith, Stephen M./Geden, Oliver/Minx, Jan C./Niemet, Gregory F. (2022): „The State of Carbon Dioxide Removal, A Global Independent Scientific Assessment, 1st Edition“. *Spiegel Online* (28.01.2022): „Aschewolke-Alarm – Vulkane behindern Luftverkehr in Bali und Japan“. <https://www.spiegel.de/reise/aktuell/aschewolke-alarm-vulkane-behindern-luftverkehr-in-bali-und-japan-a-742158.html>.
- Spiegel Online* (05.01.2022): „Späte Bronzezeit – Archäologen finden erste Opfer der Supereruption von Santorin“. <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/aegaeis-archaeologen-finden-erste-opfer-der-supereruption-von-santorin-a-68813cb3-d063-416a-bb32-a04294a35f75>.
- Stiglitz, Joseph (2010): *The Stiglitz Report*. New York: The New Press.
- Verein Deutscher Zementwerke (2019): „Zementindustrie im Überblick 2019/2020“. Berlin. Online-Ausgabe: <https://www.vdz-online.de/publikationen>; <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2019-2020>.
- Verein Deutscher Zementwerke (2020): „Zementindustrie im Überblick 2020/2021“. Berlin. Online-Ausgaben: <https://www.vdz-online.de/publikationen>; <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2020-2021>; siehe auch: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/klimaschutz/uebersicht>.
- Yin Yip, Ngai/ Brogioli, Dorian/Hamelers, Hubertus V. M./Nijmeijer, Kitty (2016): „Salinity Gradients for Sustainable Energy: Primer, Progress, and Prospects“. *Environ. Sci. Technol.* 50, 12072–12094, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03448>.
- Wang, Luo/Jiang, Wenyong/Jiang, Dabang/Zou, Yafei/Liu, Yeyi/Zhang, Enlou/Hao, Qingzhen/ Zhang, Deguo/Zhang, D. T./Peng, Z. Y./Xu, Bing/Yang, Xiangdong/Lu, H. Y. (2018): „Prolonged Heavy Snowfall During the Younger Dryas“. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 13,748–13,762. <https://doi.org/10.1029/2018JD029271>.
- Wikipedia: „Jüngere Dryaszeit“. Abgerufen: 09.07.2023, [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=J%C3%BCngere\\_Dryaszeit&oldid=235315684](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=J%C3%BCngere_Dryaszeit&oldid=235315684).
- Wikipedia: „Laacher See“. Abgerufen: 08.07.2023, [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Laacher\\_See&oldid=235283564](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Laacher_See&oldid=235283564).
- Wikipedia: „Minoische Eruption“. Abgerufen: 30.04.2023, [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Minoische\\_Eruption&oldid=233281362](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Minoische_Eruption&oldid=233281362).
- Wikipedia: „Vulkanexplosivitätsindex“. Abgerufen: 07.02.2023, <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Vulkanexplosivit%C3%A4tsindex&oldid=230656515>.
- ZDF-heute (07.06.2023): „Diese Folgen hat der Krieg für das Klima“. <https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/klima-fussabdruck-ukraine-krieg-russland-100.html>

#### **E-Mail-Adressen der Verfasser:**

woebel@email.de  
rainer.feistel@io-warnemuende.de  
ernst-christoph.hass@web.de  
peter\_plath@t-online.de