**Von grünem Wasserstoff und farblosem CO2**

Keywords

Grüner Wasserstoff, Decarbonisierung, Klimawandel, Meeresspiegelerhöhung, Nachhaltigkeit (green hydrogen, decarbonization, climate change, sea level rise, sustainability)

Abstract

Replacing carbon-based fuels with hydrogen will not sustainably prevent an ice cube from melting, as CO2 is just one of the (many) causes of human-caused climate change.

From an energetic and climatic point of view, it does not matter whether the heat input into the atmosphere occurs through the combustion of fossil carbon or through the combustion of hydrogen (which is difficult to produce):

The desired decarbonization **alone** cannot slow the speed of climate change in our time. Whether global primary energy consumption is based on carbon or hydrogen remains irrelevant to the lifetime of the heat-storing CO2 molecules in atmosphere. Several literature sources on the lifetime of CO2 in the atmosphere vary between a few decades and 1000 years. It is possible that the differences in lifetime are due to the fact that different system boundaries are taken into account.

The start of slowing climate change the day after CO2 is no longer released into the atmosphere will certainly only have noticeable consequences several generations later.

From today's perspective, the hydrogen-based energy economy cannot be an equivalent replacement for a carbon-based energy economy, but rather only an intermediate step on the way to greater energy efficiency. Energy efficiency means that the ratio between the effort for “energy production” (actually energy conversion) and the benefit as “energy use” (proportion of energy that can be converted into work) must decrease significantly. How? For example, by developing more energy-efficient processes and machines, improving heat storage, using CO2-free renewable energies and using waste heat as much as possible.

Sustainability is nothing more than common sense and concerning the use of energy it means daring to be more energetically truthful through greater energy efficiency.

Zusammenfassung

Der Ersatz kohlenstoffbasierter Kraftstoffe durch Wasserstoff wird das Schmelzen eines Eiswürfels nicht nachhaltig verhindern, da CO2 nur eine der (vielen) Ursachen des vom Menschen verursachten Klimawandels ist.

Aus energetischer und klimatischer Sicht spielt es keine Rolle, ob der Wärmeeintrag in die Atmosphäre durch die Verbrennung von fossilem Kohlenstoff oder durch die Verbrennung von (schwer herzustellendem) Wasserstoff erfolgt:

Die angestrebte Dekarbonisierung allein kann die Geschwindigkeit des Klimawandels in unserer Zeit nicht bremsen. Ob der weltweite Primärenergieverbrauch auf Kohlenstoff oder Wasserstoff basiert, bleibt für die Lebensdauer der wärmespeichernden CO2-Moleküle in der Atmosphäre unerheblich. Die Literaturquellen zur Lebensdauer von CO2 in der Atmosphäre schwanken zwischen einigen Jahrzehnten und 1000 Jahren. Möglicherweise sind die Unterschiede in der Lebensdauer darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche Systemgrenzen berücksichtigt werden.

Der Beginn der Verlangsamung des Klimawandels am Tag, nachdem kein CO2 mehr in die Atmosphäre freigesetzt wird, wird sicherlich erst einige Generationen später spürbare Folgen haben.

Aus heutiger Sicht kann die wasserstoffbasierte Energiewirtschaft kein gleichwertiger Ersatz für eine kohlenstoffbasierte Energiewirtschaft sein, sondern nur ein Zwischenschritt auf dem Weg zu mehr Energieeffizienz. Energieeffizienz bedeutet, dass das Verhältnis zwischen dem Aufwand für die „Energieerzeugung“ (eigentlich Energieumwandlung) und dem Nutzen als „Energienutzung“ (Anteil der Energie, die in Arbeit umgewandelt werden kann) deutlich sinken muss. Wie? Zum Beispiel durch die Entwicklung energieeffizienterer Prozesse und Maschinen, die Verbesserung der Wärmespeicherung, die Nutzung CO2-freier erneuerbarer Energien und die weitestgehende Nutzung von Abwärme.

Nachhaltigkeit ist nichts anderes, als gesunder Menschenverstand und bedeutet auch, durch mehr Energieeffizienz mehr energetische Wahrhaftigkeit zu wagen.​

Einführung

Man braucht Energie (z.B. in Form von Wärme), um den abgebildeten Eiswürfel zu schmelzen und es braucht mindestens dieselbe Energiemenge, um ihn wieder herzustellen. (siehe Abbildung Nr. 1) Dargestellt ist ein 10x10x10 cm großer Eiswürfel, für den ein Mittelklasse Benziner-KFZ weniger als 200 m Fahrtstrecke braucht, um ihn durch seine freigesetzte Wärme zu schmelzen.



Abbildung 1: Eiswürfel als Synonym für Gletscher uns Eisflächen

Energie in Form von Wärme lässt sich „erzeugen“ durch Verbrennen von kohlenstoffhaltigem Material, wobei neben Wasserdampf das Klimagas CO2 entsteht und in die Atmosphäre entweicht. Energie lässt sich alternativ auch durch Verbrennen von Wasserstoffgas mit Sauerstoff (entweder in reiner Form oder aus der Luft) zu Wasserdampf „erzeugen“.

Eigentlich handelt es sich bei beiden Prozessen um keine Energie-„erzeugung“, sondern um eine Umwandlung chemischer Energie in Bewegungsenergie und entstehender Abwärme.

Die klimatischen Nebenwirkungen der Kohlenstoffbasierten Industrialisierung sind derzeit mehr als offensichtlich und der Ersatz des Kohlenstoffs durch Wasserstoff wird derzeit intensiv geplant und vorbereitet.

Bedarf und Verfügbarkeit von Wasserstoff

Der zukünftige Bedarf an Wasserstoff aufgrund der nationalen politischen und technischen Weichenstellungen wird mittelfristig nicht durch dessen Verfügbarkeiten gedeckt werden und erfordert darüber hinaus planbare sowie sehr große Investitionen, nicht nur in die Wasserstoffinfrastruktur. Die Basis hierfür ist die

„Nationale Wasserstoffstrategie“ mit eindeutigen Zielen für die mittelfristige Zukunft:

„Bis 2030 will die Bundesregierung zehn Gigawatt Elektrolysekapazität aufbauen. Das reicht voraussichtlich aus, um 30 bis 50 Prozent des deutschen Wasserstoffbedarfs zu decken“.

(<https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html>, Zugriff 1.11.2023)

Die Abschätzungen zum Wasserstoffbedarf schwanken je nach den gemachten Voraussetzungen in den jeweiligen Studien:

„Der deutsche Wärmemarkt spielt aufgrund seiner Größe eine wichtige Rolle auf dem Weg zur Klimaneutralität. Je nach Definition umfasst der Wärmemarkt einen Endenergieverbrauch von rund 700 TWh/a (Wärme- und Kälteanwendungen in Wohngebäuden und Gewerbe) bis hin zu 1.400 TWh/a, wenn Prozesswärmeanwendungen in der Industrie mit zum „Wärmemarkt“ gerechnet werden“. (<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202116-1-dvgw-verfuegbarkeit-kostenvergleich-h2.pdf>, Zugriff 1.11.2023)

Dies wird in einer aktuellen Quelle des deutschen Bundestages zusammengefasst deutlich:

„*Da die Wasserstoffwirtschaft vor dem Markthochlauf steht, sind Einschätzungen zum zukünftigen Bedarf von Wasserstoff mit besonderen Unwägbarkeiten verbunden. Gleichwohl prognostizieren soweit ersichtlich Studien unter Zugrundelegung einer anhaltenden Entwicklung zur Dekarbonisierung und Elektrifizierung mehrheitlich, dass der Wasserstoffbedarf Deutschlands einschließlich der durch Wasserstoff produzierten Folgeprodukte im Vergleich zum jetzigen Verbrauch bis 2030 moderat und ab 2030 bis 2050 stark zunehmen wird.*

*Im Hinblick auf die Höhe des für 2050 prognostizierten Wasserstoffbedarfs einschließlich der Folgeprodukte werden – ausgehend von einem weitgehend als gesichert erachteten steigenden Bedarf – in den hier berücksichtigten Studien verschiedene Größenordnungen vertreten. Diese bewegen sich innerhalb einer vergleichsweise großen Bandbreite zwischen 400 bis etwas über 800 TWh im Jahr oder aber auf niedrigerem Niveau, etwa in Höhe von 169 bis 449 TWh jährlich. Allerdings wurde hier jedenfalls teilweise nur Wasserstoff ohne Folgeprodukte berücksichtigt, so dass die Ergebnisse bedingt vergleichbar sind. Eine fehlende Vergleichbarkeit der Studienergebnisse ergibt sich auch dadurch, dass Studien von unterschiedlichen Grundannahmen ausgehen. Als Voraussetzung eines steigenden Bedarfs an Wasserstoff und Syntheseprodukten schlechthin werden zwar soweit ersichtlich durchgängig Treibhausgasminderungszielen von mehr als 80 % angenommen.*

*Hiervon ausgehend treffen die Studien allerdings mitunter unterschiedliche sozioökonomische und technologiespezifische Grundannahmen bzw. modellieren unterschiedliche Szenarien. Dies umfasst auch die Frage, welche Nachfragesektoren bei der Bedarfsanalyse einbezogen werden. Die eingeschränkte Vergleichbarkeit trägt in Verbindung mit der eingangs erwähnten dynamischen Entwicklung im Bereich der Wasserstoffwirtschaft dazu bei, dass der zukünftige Bedarf schwer prognostizierbar ist*.“ (<https://www.bundestag.de/resource/blob/940168/7c5b943fdb5e9626ccc444a5bf30ff7b/WD-5-014-23-pdf-data.pdf>, Zugriff 1.11.2023)

Angesichts der bereits geplanten und absehbaren, gewaltigen investiven Maßnahmen soll nachstehend die Grundsatzfrage diskutiert werden, ob der Ersatz der fossilen Kohlenstoffwirtschaft durch die geplante Decarbonisierung allein (mittel- und langfristig) die gewünschten und notwendigen Klimaziele erreicht.

Die Verbrennung von Kohlenstoff bzw. alternativ von Wasserstoff

Sowohl die Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material, als auch die Verbrennung von Wasserstoffgas „liefert“ Energie (genauer: wandelt chemische Energie in andere Energieformen um). Bei der Verbrennung von Kohlenstoffhaltigem Material entsteht u.a. das Gas CO2 und beim Verbrennen von Wasserstoff entsteht Wasser.

Die Verbrennung von 4,032 kg Wasserstoff mit 31,98 kg Sauerstoff liefert 36,01 kg Wasser theoretisch CO2 – frei nach folgender Reaktionsgleichung:

#### 2 H2 + O2 = 2H2O

#### sowie eine Energie (in Form von Wärme) von 573.000 kJ. Das sind 159,17

#### kWh (Kilowattstunden).

#### Wäre das Ausmaß der CO2- Emissionen in die Atmosphäre die einzige Ursache des anthropogenen Klimawandels und wäre die Lebensdauer des CO2 – Moleküls in der Atmosphäre mit einigen Wochen, Monaten oder wenigen Jahren sehr kurz, dann würde der anthropogene Klimawandeln in absehbarer Zeit von einigen Jahrzehnten zu stoppen sein und vielleicht sogar umkehrbar.

Aber, es sieht so aus, dass neben der CO2 Eintragsmenge in die Atmosphäre auch der (entropiebedingte) Wärmeeintrag in die Atmosphäre und der Faktor Zeit eine mindestens gleich große Rolle spielt. Vereinfacht formuliert wärmen wir offensichtlich die Atmosphäre schneller auf, als sie sich in Richtung Universum abkühlen kann.

Das CO2 und auch der Wasserdampf in der Atmosphäre absorbieren beide als Moleküle Wärme und erhöhen so die Zahl ihrer Bewegungszustände (gleichbedeutend mit einer Entropiezunahme), unabhängig davon, nach welcher chemischen Reaktionsgleichung Energie, z.B. in Form von Wärme und Entropie gebildet wird:

* bislang im Rahmen der Kohlenstoffwirtschaft nach

C + O2 = CO2 und es werden pro 12 kg Kohlenstoff bzw. 44 kg CO2 393.000 kJ Energie (in Form von Wärme) frei. Das sind umgerechnet 109 kWh

* oder – wie bereits oben aufgeführt - nach folgender Reaktionsgleichung:

2 H2 + O2 = 2H2O

sowie eine Energie (in Form von Wärme) von 573.000 kJ. Das sind 159,17

kWh (Kilowattstunden).

#### Diese chemischen Reaktionsgleichungen und deren zugehörige Reaktionswärmen sind unabhängig von der nicht vorhandenen Farbe des Wasserstoffs (als „grün“ wird dieser erst bezeichnet, wenn Energieüberschüsse aus regenerativen Quellen verwendet werden) und des farblosen Gases CO2.

Die Herstellung von Wasserstoff und Sauerstoff

Allgemein einig ist man sich, dass die Herstellung von Wasserstoff energieaufwändig ist. Wasserstoff und Sauerstoff verbrennen unter Energiefreisetzung zu Wasser. Hierzu folgen einige beispielhafte Berechnungen.

Um 1 kg Wasserstoff zu erzeugen, sind etwa 53 kW Strom notwendig, wird dieses kg Wasserstoff verbrannt, so entstehen 39,6 Kilowattstunden Energie (<https://www.gasag.de/magazin/neudenken/wie-viel-strom-fuer-1kg-wasserstoff>, Zugriff 3.10.2023). Die Differenz von ca. **26 Prozent ist dem** Wirkungsgrad der Elektrolyse geschuldet, der derzeit etwa bei 74 Prozent liegt.

|  |  |
| --- | --- |
| Die Herstellung von reinem Sauerstoff aus Luft durch das alt bekannte Lindeverfahren erfordert ebenfalls elektrische Energie, für das Ausfrieren der Luft. Der hierfür erforderliche Primärenergiebedarf beträgt 2,33 GJ/1000 kg. Das entspricht pro kg herzustellendem Sauerstoff einem Energiebedarf von 0,647 kWh. |  |

([https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d11011-2/\*/\*/Sauerstoff.html?op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d11011-2/*/*/Sauerstoff.html?op=Wiki.getwiki), Zugriff 3.10.2023)

Zusammengefasst erhalten wir bei dem oben angegebenen Wirkungsgrad 159,17 kWh Wärmeenergie aus der Verbrennung von Wasserstoff mit reinem Sauerstoff und benötigen dazu 159,66 kWh für die erforderliche Wasserstoffmenge sowie für die erforderliche Sauerstoffmenge zusätzliche 20,69 kWh.

In der Summe werden so aus 180,35 kWh Energieaufwand für die Herstellung von Wasserstoff und Sauerstoff 159,17 kWh Energie (in Form von Wärme). Wir wollen voraussetzen, dass die Herstellung der Rohstoffe Wasserstoff und Sauerstoff CO2 – frei gelingt.

Zusammenhang zwischen Energie- „Verbrauch“ und Entropie

Ein Teil der Energie kann in Arbeit umgewandelt werden, ein anderer Teil nicht.

Durch unser Handeln verbrauchen wir Energie, die in Arbeit umgewandelt werden kann, zu nicht mehr nutzbarer Abwärme „Entropie“, die in die Atmosphäre entweicht. Und dieser „Verbrauch“ von in Arbeit umwandelbare Energie in „Entropie“ geschieht früher oder später vollständig.

Ein benzinangetriebenes Auto hat einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von nur ca. 30–35 %. Das heißt, von 1 L „Kraftstoff“ gehen 300–350 mL in die Fortbewegung des Autos und 650–700 mL als Abwärme direkt in die Atmosphäre. Ein durchschnittlicher Mittelklassewagen fährt nur ca. 200 m (!), um einen 10x10x10 cm großen Eiswürfel (siehe obige Abbildung) durch die frei werdende Abwärme irreversibel zu schmelzen.

Ein typischer Mittelklasse-Benziner mit seinem Wirkungssgrad („Effizienz“) von ca. 30 %, einem geschätzten durchschnittlichen Verbrauch von ca. 7 L/100km und einer angenommene jährliche Fahrleistung von ca. 21.450 km bringen unter diesen Voraussetzungen pro Jahr einen Eiswürfel mit einem Volumen von 113 m3 zum Schmelzen!

Was lässt einen Eiswürfel schmelzen?

Ein Eiswürfel schmilzt unumkehrbar durch mehrere, menschenverursachte Ursachen: Klimagase wie das CO2 und der Wasserdampf in der Atmosphäre, die Summe der Wärmeeinträge in die Atmosphäre und die Geschwindigkeit des Wärmeeintrags.

Wärmeeintrag in die Atmosphäre und die Meeresspiegelerhöhung

Der Weltprimärenergiebedarf betrug 2022: 604 x 1015 kJ (im Vergleich dazu 2016: 554 x 1015 kJ, eine ca. 10 %ige Steigerung innerhalb von nur 6 Jahren; andere Quellen sprechen von einer etwa 4 %igen Steigerung innerhalb derselben 6 Jahre). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/42226/umfrage/welt-insgesamt-verbrauch-an-primaerenergie-in-millionen-tonnen-oelaequivalent/#:~:text=Der%20globale%20Verbrauch%20an%20Prim%C3%A4renergie%20belief%20sich,im%20Jahr%202022%20auf%20rund%20604%2C04%20Exajoule>, Zugriff 3.10.2023)

Der weltweite Primärenergieverbrauch von 604 x 1015kJ im Jahr 2022 führt in Wärme umgerechnet zu einem jährlich geschmolzenen Eiswürfel von 1,56 x 1012 m3, ein Würfel von etwa 12 km Kantenlänge. Auf 100 Jahre berechnet und unter der Annahme einer Verdoppelung des Weltenergieverbrauchs errechnet sich ein entsprechender Anstieg des Meeresspiegels um ca. 90 - 95 cm bis zum Jahr 2100 (bezogen auf das Jahr 2000). Eine nicht unrealistische Verdreifachung des „Energieverbrauchs“ entspräche rechnerisch einem Meeresspiegelanstieg um ca. 140 cm.

(<https://meine-onlinezeitung.de/politik/28895-wie-kommt-der-eisbaer-auf-die-gruene-wiese-klimawandel-einfach-erklaert-mit-prof-dr-manfred-sietz>, Zugriff 3.10.2023)

Wärme wird in der Atmosphäre nicht nur in den CO2 Molekülen und anderen bekannten Klimagasen, sondern auch im Wasserdampf sowie in Wassertropfen gespeichert.

Wenn wir z.B. die Abwärme eines Kraftwerks in Kühltürmen durch Verdampfen von Wasser und Wolkenbildung in die Atmosphäre transferieren, anstatt sie z.B. in Nah- und Fernwärmenetzen zu nutzen, so stellt dies einen zusätzlichen und klimarelevanten Wärmeeintrag dar. Natürlicherweise kühlt die Atmosphäre (vor allem in klaren, wolkenlosen Nächten) in Richtung Universum ab. Wenn aber der Wärmeeintrag schneller stattfindet, als der globale, natürliche Abkühlungsprozess in Richtung Universum, ist die zu beobachtende globale Eisschmelze und damit verbunden die Meeresspiegelerhöhung keine Überraschung.

Das vermeintliche Argument, die Eisverluste der Sommerhalbkugel werden durch die Eisneubildung auf der Winterhalbkugel kompensiert, sind nicht richtig. Nachvollziehbar sind die jährlichen Nettooeisverluste global für alle sichtlich.

Ausblick

Der Einsatz von Wasserstoff zum Ersatz des Kohlenstoffs wird nicht dadurch nachhaltiger, in dem wir ihn als immer „grüner“ bezeichnen.

Hätten die beiden Gase Wasserstoff und CO2 eine Farbe, dann wären uns die Folgen des Klimawandels und der nachhaltige Handlungsbedarf viel schneller durch Farbänderung unseres vielgepriesenen „blauen“ Himmels bewusst geworden.

Zum Glück sind Wasserdampf und CO2 als Gase farblos und einige Hundert ppm CO2 bzw. ca. 0,25 % Wasserdampf in der Atmosphäre machen dem Blau des Himmels (bislang) sichtbar nichts aus.

Unabhängig von dem, was wir mit bloßen Augen sehen können muss die Decarbonisierung die Energieeffizienz sowie den Faktor Zeit im Auge behalten, um die Atmosphäre bei wolkenlosem Himmel blau zu erhalten. Vielleicht müssen wir (einfach nur) mehr Zeit gewinnen, um mit verbesserten Wirkungsgraden die Erde klimatechnisch wieder in ein Gleichgewicht zu bringen.

Prof. Dr. Manfred Sietz

www.nachhaltigkeit-sietz.de