

Bernhard Weßling, Jersbek

Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit - CO₂-Endlagerung und -Nutzung erweisen sich als nicht nachhaltig -

Die Grundsätze der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik werden kurz besprochen, wobei der Schwerpunkt auf der Entropie liegt. Erstmals werden der Energieverbrauch und die Entropieproduktion der CO₂-Endlagerung und der -Nutzung (CCS bzw. CCU) quantitativ untersucht und interpretiert. Damit wird gezeigt, dass Endlagerung bzw. chemische Nutzung von CO₂ keine nachhaltigen Prozesse zur Lösung der Klimakrise sind. Darauf aufbauend wird ein neuer Vorschlag für ein quantitatives Kriterium für Nachhaltigkeit dargestellt: die Entropie. Zusätzlich wird eine relativ einfache Kennzahl vorgestellt, die ein hilfreicher (und einfacher zu berechnender) Indikator für die Entropieproduktion verschiedener Verfahren oder Produkte ist.

In der weltweiten Diskussion über nachhaltiges Ressourcenmanagement, sei es im Zusammenhang mit der biologischen Vielfalt oder der Klimakrise, spielt die Thermodynamik fast keine Rolle, und noch weniger die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik. Während die letztgenannte Thermodynamik und die "Entropie" nur sehr selten in Büchern und Abhandlungen über Umweltthemen erklärt und erwähnt werden, z. B. in dem Buch "A New Ecology Systems Perspective" (Nielsen und Plath 2020), das die Prinzipien der Entwicklung und des Funktionierens von Ökosystemen aufzeigt, wird sie bisher nicht für die Bewertung der Nachhaltigkeit bestimmter technologischer Ökosystemmanagement- oder Klimaschutzmaßnahmen verwendet.

In meinem Essay „Zufall und Komplexität sind Geschwister“ (NR 9/10-2023) hatte ich zum ersten Mal Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit vorgeschlagen; das hat einige (überwiegend kritische) Reaktionen hervorgerufen, aber auch, wie z. B. von Ulrich Lüttge in seinem Essay in NR 3-2024, zustimmende. Beides regte mich an, tiefer zu gehen: Im folgenden werden einige erste (auch quantitative) Versuche zur Anwendung der Entropie als Nachhaltigkeits-Kriterium vorgestellt. Nach einem Blick auf einige Schlüsselprinzipien der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik werden wir einige erste Schritte hin zu einer quantitativen Analyse des Energiebedarfs und der Entropieproduktion von CCS („Carbon[dioxide] Capture & Storage“-) und CCU („Carbon[dioxide] Capture & Use“-) Prozessen entwickeln. Damit lässt sich, wie gezeigt wird, prüfen, ob solche Verfahren nachhaltig sind. Damit kann Entropie generell als Kriterium für Nachhaltigkeit in die Diskussion eingebracht werden. Abschließend wird mit der „MIPS“ (Materialintensität pro Serviceeinheit) eine vor etlichen Jahren bereits eingeführte, aber zwischenzeitlich vergessene Kennziffer als einfacheres Herangehen an diese Fragestellung vorgestellt.

Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik und dissipative Strukturen

In NR 9/2023 wurden auf dem Umweg über Zufall und Komplexität einige Prinzipien der Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik dargelegt (Weßling 2023). Sie ist grundlegend von Ilya Prigogine entwickelt worden, wofür er 1977 den Nobelpreis erhielt (Nobel Prize Committee 1977). Er beschrieb zum ersten Mal die Selbstorganisation zu komplexen Strukturen und nannte sie "dissipative Strukturen". "Dissipativ" deshalb, weil offene Systeme aufgrund eines überkritischen Energieinputs weit vom Gleichgewicht entfernt sind und den Energiefluss nicht anders

kompensieren ("dissipieren") können als durch die Bildung komplexer Strukturen, was mit einem starken Entropieexport in die Umgebung außerhalb des offenen Systems verbunden ist. Entropieexport nach außerhalb eines offenen Systems bedeutet Entropieverminderung innerhalb dieses Systems, was einer Erhöhung des Komplexitätsgrades gleichkommt.

Besonders einfach anschaulich wird dies bei der Betrachtung von Bénard-Zellen, die ich in NR 9/2023 gezeigt habe. Diese bilden sich, sobald man eine mit Öl gefüllte Glasschale (zur besseren Sichtbarkeit enthält sie feine Metallspäne) von unten erhitzt und die Wärmezufuhr langsam erhöht. Wird eine charakteristische Wärmezufuhr überschritten, bilden sich plötzlich 5- und 6-eckige Zellen, weil das Öl die überkritische Wärme nicht anders abführen (*dissipieren*) kann: Die Zellen wälzen sich synchron ab, wodurch die überschüssige Wärme effektiv abgeführt wird.

Prigogine untersuchte insbesondere auch zyklische Reaktionen, darunter die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion. Diese Reaktion bildet immer wieder komplexe Muster, die im Detail jedes Mal anders aussehen, die ebenfalls in dem damaligen Artikel zu sehen sind.

Hier möchte ich zur Verdeutlichung auf den Unterschied zwischen komplexen Eiskristallen und gezüchteten Einkristallen hinweisen, siehe Abb. 1:



Abb. 1.1 Eiskristalle, die sich über Nacht bei Minusgraden auf der Erdoberfläche gebildet haben (eigenes Foto)

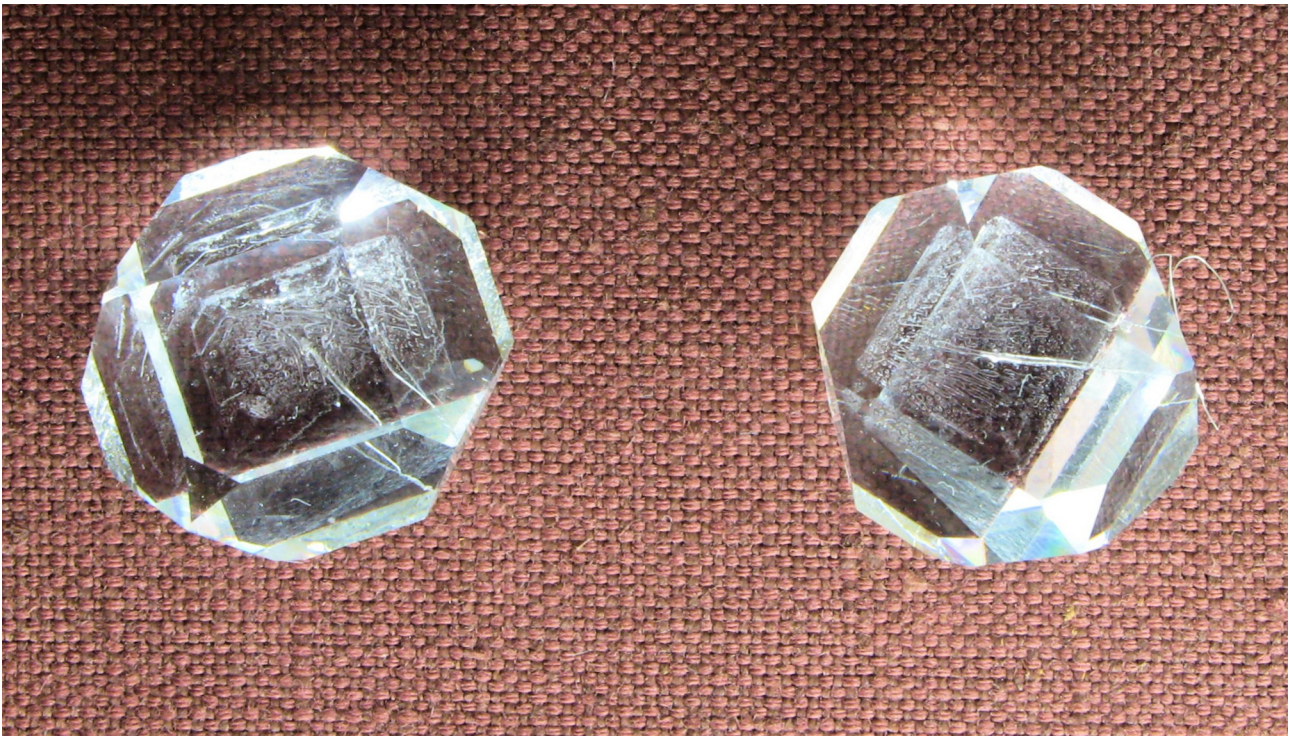


Abb. 1.2 Blei(II)-Nitrat-Einkristalle (Geomuseum Köln, Wikimedia Commons)

Einkristalle sind mit ihrer Regelmäßigkeit besonders „einfach“ (weil symmetrisch) aufgebaut und weisen daher ein Maximum an Entropie auf. Es ist ein Irrtum zu glauben, dass Entropie nur ein Anzeichen für „Unordnung“ sei, sie ist vielmehr ein Anzeichen für „Einfachheit“ – das heißt: In einem System, in dem die verschiedenen Volumenelemente gar nicht oder nahezu nicht unterscheidbar sind, sondern alle praktisch (oder sogar im Detail) identisch aussehen, liegt ein Maximum an Entropie vor. Entweder wie die Elementarzelle eines Kristalls, die in einem Einkristall (Abb. 1.2) überall genau gleich zu finden sind. Oder wie die Verteilung gelöster Zuckermoleküle in Wasser: In jedem Volumenelement wird man (wenn die Lösung perfekt ist) die gleiche Anzahl Zuckermoleküle finden, und ihre Anordnung kann von einem zum anderen und zum dritten Volumenelement nicht unterschieden werden. Dies sind Gleichgewichts-Systeme.

Ganz anders in einem komplexen System, wie den Eiskristallen in Abb. 1.1 oder Schneeflocken: Jedes Volumenelement in Abb. 1.1, jede Schneeflocke sieht anders aus (es gibt keine 2 wirklich exakt identischen Schneeflocken, wie im Buch „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“ dargelegt wird). Beide Arten von Kristallen, wie die in Abb. 1.1 oder Schneeflocken, entstehen in Nicht-Gleichgewichts-Systemen, und dort entstehen komplexe Strukturen.

Prigogine zufolge ist dies darauf zurückzuführen, dass ein überkritischer Energieeintrag ein offenes System in einen Zustand fernab vom Gleichgewicht zwingt und Entropie exportiert wird. Und dies ist der entscheidende Punkt, der das herkömmliche, auf der klassischen Gleichgewichts-Thermodynamik basierende Verständnis grundlegend erweitert:

Während im Maßstab des gesamten Universums die Entropie ständig zunimmt und nur zunehmen kann (2. Hauptsatz der Thermodynamik), ist dies in einem offenen System nicht (unbedingt) der Fall. Aus diesen kann Entropie exportiert werden, sie wird also verringert – und ein höherer Komplexitätsgrad ist nach Boltzmanns statistischer Interpretation identisch mit einem geringeren Entropiegehalt. Je komplexer die Ordnung, desto niedriger die Entropie: Ein regelmäßiger Kristall

hat eine höhere Entropie als eine Eichenkrone; dort sind die Äste zweier Eichen jeweils in anderen Volumensegmenten, die Systemelemente (hier: die Zellen, die Äste und Rinde bilden) befinden sich in anderen Volumenelementen als diejenigen einer anderen Eiche, selbst wenn sie genetisch identisch, gleich alt sind und nebeneinander aufwuchsen.



Abb. 2 Keine Krone einer Eiche sieht genauso aus wie die einer anderen Eiche.
(https://naturfotografen-forum.de/data/o/95/476656/image::dr.karl-heinz_limmer.jpg, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Limmer.)

Der Grund dafür ist die Tatsache, dass in allen solchen Nicht-Gleichgewichts-Systemen Prozesse ablaufen, die mit nichtlinearen Gleichungen beschrieben werden; und diese Prozesse stehen auch untereinander in Wechselwirkung, was dazu führt, dass sich das ganze System extrem nichtlinear verhält. Mit anderen Worten: Es ist im Prinzip nicht vorhersehbar, wie sich die nichtlinearen Prozesse, die sich noch gegenseitig beeinflussen, letztendlich verhalten werden. Das führt dazu, dass im Laufe der Zeit, während eine überkritische Menge an Energie (und möglicherweise auch Materie) in das offene System fließt, immer wieder "Bifurkationen" (wie Prigogine es nannte, also „Verzweigungen“) auftreten: Das System kann unvorhersehbar plötzlich einen anderen Verlauf nehmen.

Im Gleichgewichts-System strebt die (freie) Energie einem Minimum zu, und entsprechende Prozesse treten spontan auf, sind reversibel, die Entropie erreicht ein Maximum. Ganz anders bei Nicht-Gleichgewichts-Systemen: Der Energiezufluss kann mehr oder weniger kontinuierlich sein, die Entropie erreicht stetig niedrigere Werte. Der Prozessablauf ist aber nicht-linear, nach einigen Bifurkationsereignissen können relativ stabile Zustände komplexer Strukturen erreicht werden. Sobald der überkritische Energiezufluss versiegt, unterliegen die komplexen Strukturen dem Zerfall: die Entropie steigt an.



Abb. 3: In Gleichgewichtssystemen, die keinen Energie- und keinen Stoffaustausch mit der Umgebung haben, sinkt die freie Energie auf ein Minimum (Abb. 3.1) und dementsprechend die Entropie auf ein Maximum; in gleichgewichtsfernen Nicht-Gleichgewichtssystemen, die es nur als offene Systeme gibt mit Energie- und Stoffaustausch mit den sie umgebenden Systemen, verhält es sich diametral entgegengesetzt (Abb. 3.2): Darin steigt die freie Energie und dementsprechend fällt die Entropie, bis sich jeweils adäquate dissipative Strukturen bilden.

Wir wissen das vom Leben, aber es wird oft übersehen, dass "Leben" (z.B. Organismen und Ökosysteme), aber auch unbelebte dynamische Systeme wie Flüsse, Wetter oder Galaxien, nicht durch Gleichgewichts-, sondern nur durch Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik beschrieben werden können: Aus offenen dynamischen Systemen wird ständig Entropie exportiert (letztlich ins Universum, dort vermutlich in Schwarze Löcher); die Prozesse verhalten sich nichtlinear, sie wechselwirken auch noch nichtlinear miteinander. Nicht-Gleichgewicht ist das, was uns am Leben erhält, "Gleichgewicht ist Zerfall und Tod" (Zitat nach Ludwig von Bertalanffy 1968; aus dem original übersetzt lautet das Zitat: *"Biologisch gesehen ist das Leben nicht die Aufrechterhaltung oder Wiederherstellung des Gleichgewichts, sondern im Wesentlichen die Aufrechterhaltung von Ungleichgewichten, wie die Lehre vom Organismus als offenem System zeigt. Das Erreichen des Gleichgewichts bedeutet Tod und konsequenten Zerfall"*). Bertalanffy ist der Schöpfer des Begriffs "Fließgleichgewicht", das überhaupt kein Gleichgewicht ist, sondern ein Nicht-Gleichgewichts-System, wie er ja selbst schrieb).

Ist das für uns relevant? Ja, nicht nur, aber auch als Kriterium für Nachhaltigkeit

Einige mögen denken, dass dies eher theoretische Überlegungen sind und dass "Entropie bestenfalls für eine akademische Diskussion interessant ist" (was ich gelegentlich als Antwort bekomme). Dem muss entschieden widersprochen werden. Im Grunde genommen ist Prigogines Thermodynamik ein weiterer Pfeiler für das Verständnis unserer Welt, gleichrangig mit der Relativitätstheorie, der Quantenphysik oder der Evolutionstheorie. Sie wird aber gar nicht so wahrgenommen, und an den Universitäten wird sie kaum gelehrt; in Thermodynamik-Lehrbüchern wird Prigogines Theorie auf kaum mehr als 20 Seiten nur sehr kurz behandelt, während die Gleichgewichts-Thermodynamik mehr als 900 Seiten einnimmt. Und das, obwohl es in der *Realität*, in der uns umgebenden Welt und der Industrie, abgesehen z. B. von Zuckerwasser oder mit Wasser verdünntem Alkohol, kaum Gleichgewichts-Systeme und -Prozesse gibt. Die überwiegende Mehrheit der industriellen chemischen Prozesse sind Nicht-Gleichgewichts-Prozesse; die weit überwiegende Mehrheit der Systeme der Umwelt, in der wir leben, sind Nicht-Gleichgewichts-Systeme: Wetter, Klima, Leben, Ökosysteme, Wirtschaft, um nur einige zu nennen (vgl. Ebeling und Feistel, 2011).

Im Gegensatz zu den anderen drei grundlegend wichtigen Theoriegebäuden ist die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik auch kein Thema im Schulunterricht. Während man, wenn man etwas über Relativitätstheorie, Quanten oder Evolution lernen will, eine ausreichende Anzahl populärwissenschaftlicher Bücher und Artikel für unterschiedliche Vorbildungsniveaus finden kann, wird man bei der Suche nach leicht verständlichen Büchern oder Artikeln über Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik oder Entropie vollständig scheitern.

Unsere sprachlichen Bilder haben sich dementsprechend auch nicht weiterentwickelt: Ständig beklagen wir, dass etwas "aus dem Gleichgewicht" ist (und wünschen uns, dass es wieder ins Gleichgewicht gebracht wird, als ob es das jemals gegeben hätte): Ökosysteme, das Klima, Wechselkurse, die Wirtschaft und das Finanzsystem im Allgemeinen. Und das Grundgesetz verlangt in Art. 109 (2), dass "den Erfordernissen des gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts" Rechnung getragen wird. Überraschenderweise ist das sogenannte "Gleichgewicht" aber nur dann gewahrt, wenn die Wirtschaft wächst; selbst bei Stagnation, also Nullwachstum, gilt die Gleichgewichtsbedingung als nicht mehr erfüllt. In Wirklichkeit ist die Wirtschaft ein komplexes Nicht-Gleichgewichtssystem und war noch nie im Gleichgewicht (wenn sie im Gleichgewicht wäre, würde nichts passieren: Energie im Minimum, Entropie im Maximum).

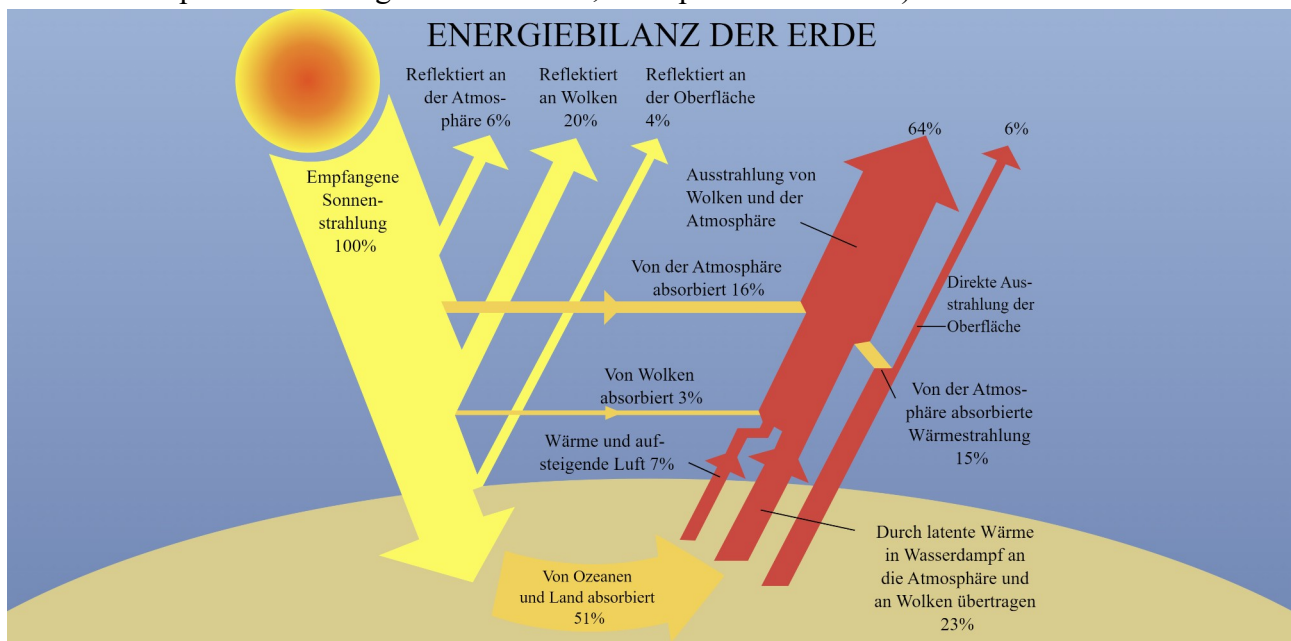


Abb. 4 Das offene System Erde mit der vorrangigen Energiequelle „Sonne“: Die von Ozeanen und an Land absorbierte Energie produziert die dissipativen Strukturen, die wir als „Leben“ kennen, und halten die Ökosysteme und auch unsere Gesellschaften am Laufen. Die „Ausstrahlung“ ist die von der Erde abgestrahlte Entropie.

Die Tatsache, dass die Welt mit uns nur deshalb existiert, weil sich glücklicherweise NICHT alles im Gleichgewicht befindet, sondern sich in mehr oder weniger stabilen dynamischen Prozessen fernab des Gleichgewichts bewegt, ist weitgehend unbekannt. Auch die Bedeutung und die Rolle der Entropie wird überwiegend nicht verstanden.

In der aktuellen Klimadebatte gibt es immer mehr Veröffentlichungen in verschiedenen Medien über Verfahren, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und entweder in tiefen Erdschichten gespeichert oder in chemischen Prozessen genutzt werden kann (Zhao 2023 und Wikipedia). Investoren und Politiker befassen sich ernsthaft damit, ein krasses Beispiel sind die "E-Fuels"

(synthetische Kraftstoffe, die mit elektrochemischen Prozessen aus Wasser und CO₂ erzeugt werden, vgl. „eFuel-Today“ 2024).



Abb. 5 Die CCS-Anlage „Mammoth“ der Firma Climeworks, die seit 2022 auf Island errichtet wird; sie soll eine Kapazität von 36.000 t CO₂ pro Jahr haben (© Climeworks 2022).

Über die verschiedenen technologischen Versuche wird keineswegs kritiklos berichtet, aber die Diskussion beschränkt sich auf Risiken (Lane 2021) und Kosten. Der Energiebedarf wird oft unkommentiert erwähnt, wenn überhaupt; die Thermodynamik und insbesondere die Entropie werden nicht berücksichtigt, weder von Journalisten noch offenbar von den Betreibern, Investoren und Politikern, die über die zu ergreifenden Klimaschutzmaßnahmen entscheiden. Wann immer erwähnt wird, dass der Energiebedarf für CCS oder CCU beträchtlich ist (allerdings ohne ihn mit dem Energiebedarf bzw. Energiegehalt alternativer Verfahren oder Materialien zu vergleichen), vertrösten die Autoren die Leser mit dem Hinweis, dass "erneuerbare Energien" dafür bereitgestellt würden: Aber weder haben wir unendlich viel davon, noch können wir sie kostenlos ernten (sondern brauchen Rohstoffe, Platz, Wasser ..., und Euros bzw. Dollars), und diese Energieumwandlung erzeugt auch eine Menge Entropie.

Erste Bewertung: Nachhaltigkeit der CO₂-Endlagerung?

Im Folgenden wird zunächst geprüft, ob die Endlagerung von CO₂ nachhaltig sein kann. Es wird viel damit geworben, dass die Endlagerung zusammen mit Vermeidung von CO₂-Emissionen DAS Allheilmittel gegen den Klimawandel sei. Des Weiteren werden wir uns mit Vorschlägen zur Verwertung von CO₂, d.h. der Umwandlung von CO₂ in nützliche Rohstoffe, beschäftigen.

Energieschätzung der Endlagerung

Wir vergleichen die Bildungsenthalpie von CO₂ mit der Energie, die benötigt wird, um das Gas aufzufangen und in tieferen Erdschichten als CaCO₃ zu speichern : 1 Tonne CO₂ enthält 22.727 Mol CO₂, das entspricht -8,9 Millionen kJ Bildungsenthalpie (molar -393) (Selnacht Lexikon), von denen wir weniger als ein Drittel (d.h. etwa 2,5 Millionen kJ) als verfügbare elektrische Energie nutzen konnten, der Rest war Abwärme und Entropie.

M. Fasahi et al. veröffentlichten eine technisch-wirtschaftliche Bewertung von Anlagen zur direkten Lufterfassung (Fasahi 2019). Wie aus ihrer Tabelle 1 hervorgeht, liegt der Gesamtwärmebedarf für CCS laut Literatur und je nach Grad der Wärmeintegration im Bereich von 1420 - 2250 kWh (thermisch) pro Tonne CO₂. Die erforderliche elektrische Leistung wird mit 366 - 764 kWh pro Tonne CO₂ angegeben. Im Folgenden werden 2000 kWh_{th} und 600 kWh_{el} als Grundlage der weiteren Betrachtungen verwendet. In der Größenordnung dieser Werte finden sich auch in verschiedenen anderen Publikationen ähnliche Werte.

Die benötigte Wärme entspricht 7,2 Mio. kJ (fast so viel wie die CO₂-Bildungsenthalpie), wird aber nicht mit 100%iger Effizienz bereitgestellt; wenn sie mit 80%iger Effizienz bereitgestellt werden kann, muss man mit 9 Mio. kJ Primärenergie beginnen, die somit der Bildungsenthalpie entspricht. Darüber hinaus entspricht die benötigte Elektrizität 2,16 Mio. kJ; bei einem weltweit durchschnittlichen Wirkungsgrad von 31 % der Kohlekraftwerke (EURACTIV) müssen 7 Mio. kJ Primärenergie bereitgestellt werden, die auch verbraucht werden.

Insgesamt sind 16 Mio. kJ erforderlich, was fast doppelt so viel ist wie die CO₂ Bildungsenergie, also ist der Energiebedarf etwa sechsmal so hoch wie die Energiemenge, die wir bei der Bildung dieser besagten 1 Tonne CO₂ nutzen konnten.

Das Argument, dass man regenerative Energie aus den heißen vulkanischen Tiefen Islands oder Solarzellenanlagen in der Wüste nutzen wolle, zieht nicht, denn man könnte auch nur Strom erzeugen und ihn mit hohem Wirkungsgrad nutzen (was in Island z.B. auch für die Aluminiumproduktion gemacht wird). Es ist also reine Energieverschwendung und in der Folge massive Entropiezunahme, wenn wir CCS-Anlagen betreiben wollen, während wir noch lange nicht genug erneuerbare Energie haben und höchstwahrscheinlich nie haben werden.



Abb. 6: Das nahe Þingvellir gelegene Nesjavellir-Kraftwerk ist das größte Geothermalkraftwerk Islands. Es stellt 120 MW an elektrischer und 300 MW an thermischer Energie bereit (<https://de.wikipedia.org/wiki/Nesjavellir-Kraftwerk>), das aber seit 1990 mit dieser Leistung nur für etwa 30 Jahre, danach nahm die Leistung kontinuierlich ab. Mit dieser elektrischen Leistung könnte nur soviel CO₂ der Luft entzogen und in der Erde endgelagert werden, wie ein 20 MW kleines konventionelles Kraftwerk an CO₂ erzeugt.

Entropiebilanz der Endlagerung

Für die Entropiebetrachtung betrachten wir zunächst die Entropie der Atmosphäre, die etwa 0,06% (Gewichtsprozent) CO₂ enthält. Da wir oben von 1 Tonne CO₂ ausgegangen sind, bedeutet dies, dass wir ein Gemisch aus CO₂ mit etwa 16,7 Tonnen anderer Bestandteile der Luft (Stickstoff und Sauerstoff und andere Bestandteile wie Wasser, Spurengase usw.) betrachten müssen (die eine CCS-Anlage ja alle durch die Filtersysteme zieht).

Die Entropie S der CO₂-haltigen Luft wird annähernd nach der Formel für die Mischungsentropie berechnet (vereinfacht für ideale Gase und geschlossene Systeme, was näherungsweise für unsere Zwecke ausreicht, Universität Ulm):

$$S = kN_1 \ln \frac{N_1 + N_2}{N_1} + kN_2 \ln \frac{N_1 + N_2}{N_2}$$

Wir haben etwa 22.727 Mol CO₂ (= 1 Tonne) in der Luft, gemischt mit etwa 380.000 Mol anderer Luftbestandteile, wenn sie das gleiche Molekulargewicht wie CO₂ hätten. Das Gemisch aus Stickstoff und Sauerstoff hat jedoch ein geringeres Molekulargewicht, so dass wir in 100 Gew.-% Luft (die 1 Tonne CO₂ enthält) etwa 380.000 * 1,5 = 570.000 Mol anderer Luftbestandteile haben.

1 Mol enthält etwa $2 \cdot 10^{23}$ Moleküle (das ist die Definition von "Mol"). Wir setzen diese Werte in die obige Formel ein und erhalten (mit der Boltzmann-Konstante $k = 1,3 \cdot 10^{-23}$)

$$2,76 \cdot 22,727 \cdot \ln\left(\frac{N + N_{\text{CO}_2 \text{ air}}}{N_{\text{CO}_2}}\right) + 2,76 \cdot 570,000 \cdot \ln\left(\frac{N + N_{\text{CO}_2 \text{ air}}}{N_{\text{air}}}\right) =$$

$$2,76 \cdot 22,727 \cdot 3,26 + 2,76 \cdot 570,000 \cdot 0,039 = 265.843 \text{ J/K}$$

Da wir 1 Tonne CO₂ aus der Luft herausfiltern wollen, die diesen extrem hohen Entropiewert hat, müssen wir die Entropie der Atmosphäre um 265.843 J/K vermindern (allerdings bei Umgebungstemperatur, also etwa 293 K), denn wenn wir reines CO₂ außerhalb der Atmosphäre erhalten, ist seine Mischungsentropie Null. (Die Mischungsentropie der übrigen Atmosphärenbestandteile bleibt unverändert.)

Wie die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik uns zeigt, kann Entropieabnahme in einem offenen System (hier: Atmosphäre) nur erreicht werden, wenn überkritisch viel Energie investiert wird (wir haben bereits gesehen, wieviel benötigt wird: Es ist *extrem* viel). Die Abnahme der Entropie (d.h.: der Export von Entropie) verursacht (aufgrund des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik) eine Zunahme der Entropie außerhalb jeder CCS-Anlage, und zwar zusätzlich zu der Entropiezunahme im Zusammenhang mit der Umwandlung und Bereitstellung der Prozessenergie.

Daran ändert auch das Argument nichts, dass es sich um regenerative Energieumwandlung handelt, die für CCS genutzt werden soll. Zu der Frage, ob wir tatsächlich einen Energieüberschuss aus regenerativen Quellen (Wind und Sonne) haben, der es uns erlauben könnte, ihn verschwenderisch zu nutzen, habe ich oben argumentiert: Wir haben diesen Überschuss nicht.

- Darüber hinaus sollten wir aber auch die Entropie berücksichtigen: Die statistische Interpretation der Entropie ist wohlbekannt; sie besagt, dass in einem System, in dem die Entropie zunimmt, auch die Komplexität abnimmt.

Wir verursachen global eine mehrfache Entropiezunahme, indem wir die Entropie des Gemischs aus der absorbierten Luft exportieren (nach außen) und indem wir die Prozessenergie bereitstellen. Also wird mit dem Anstieg der Entropie irgendwo auf der Erde die Komplexität abnehmen. Das merken wir dann dort, wo wir die Rohstoffe für die Herstellung der Geräte (mit deren Hilfe wir die Energie bereitstellen) gewinnen und wo wir sie zu den Geräten verarbeiten:

Silizium usw. für Solarzellen mit der gesamten elektrischen, elektronischen und mechanischen Feinstruktur, Lithiumabbau für Batterien, Wasser (große Mengen Brauchwasser für die Endlagerung), Zement für Windkraft, Stromnetze und so weiter. Für all dies wird Land benötigt, das für die biologische Vielfalt (= Komplexität) nicht mehr zur Verfügung steht. Die Verschlechterung der biologischen Vielfalt ist ein Indikator für die Zunahme der Entropie, was identisch ist mit Schäden an der Umwelt.



Abb. 7: Rohstoffabbau im Tagebau führt zur Zerstörung von Landschaften / Ökosystemen und zur ausgedehnten Absenkung des Grundwassers mit weitreichenden Schäden für die Umwelt. Hier der Abbau von Kupfer im Escondida-Kupferbergwerk in Chile (NASA image of Escondida Mine in Chile, taken by [en:ASTER](#) on April 23, 2000)

Ein weiterer Aspekt muss ebenfalls berücksichtigt werden, nämlich die Größenordnungen, mit denen wir umgehen müssen. Niall Mac Dowell et al. analysierten "die

Rolle der CO₂-Abscheidung und Nutzung bei der Abschwächung des Klimawandels" (Titel ihrer Arbeit, aus dem Englischen übersetzt) (MacDowell 2017). Sie zeigten anhand des Volumens von CO₂, das in tiefe Erdspeicher gepresst werden müsste, dass diese 1033 Millionen Barrel CO₂ pro Tag betragen müssten, wenn nur die weltweite CO₂-Tagesproduktion aufgefangen werden müsste. Die derzeitige weltweite Ölproduktion wird mit 87 bis 91 Millionen Barrel pro Tag angegeben. Dann schreiben sie: "Das bedeutet, dass die weltweite CO₂-Produktion [wenn man das Volumen betrachtet] heute etwa um den Faktor 10 größer ist als die weltweite Ölproduktion und bei den derzeitigen Wachstumsraten im Jahr 2050 sogar um den Faktor 20 größer sein könnte." Dies würde bedeuten, so heißt es weiter, dass bis 2050 [also innerhalb von nunmehr nur 25 Jahren] eine Industrie aufgebaut werden müsste, "die wesentlich größer ist als die globale Ölindustrie", während der Umfang der heutigen globalen Ölindustrie innerhalb eines ganzen Jahrhunderts aufgebaut wurde. Selbst wenn es denkbar erschiene, eine so gigantische Ölindustrie ab dem nächsten Jahr so schnell aufzubauen – wo sollen die Rohstoffe dafür herkommen, wo sollen diese riesigen Fabriken stehen, wo soll das CO₂ endgelagert werden, wieviel Verflüssigungsanlagen müssten zusätzlich gebaut werden, um allein das in Deutschland emittierte CO₂ nach Norwegen und Dänemark zur Endlagerung unter dem Meeresboden zu verschiffen, wo soll die dafür benötigte gigantische Energiemenge herkommen? Und das zunächst nur dafür, die dann noch zusätzlich emittierten CO₂-Mengen aufzufangen bzw aus der Atmosphäre zu entfernen, damit ist noch lange keine Verminderung der CO₂-Konzentration erreicht.

Die gewaltige Erhöhung der Entropieproduktion zeigt an, dass die Kollateralschäden von CCS-Verfahren um ein Vielfaches größer sein werden als der erhoffte positive Effekt für das Klima. Das gilt auch für die häufig angeführte Beschränkung solcher Verfahren auf das Abfangen von CO₂ aus industrieller Abluft („direct air capture“, DAC). Es ist ja nicht so, dass in dieser Abluft das CO₂ zu 100% oder mindestens zu über 90% konzentriert vorliegt, sondern nur etwa 15% Anteile an der Abluft aufweist. Im Unterschied zur Umgebungsluft enthält die Abluft außerdem aber noch beträchtliche Anteile an Stäuben, anderen schädlichen Gasen (nicht nur Stickstoff) und Wasser. Diese machen DAC zu einem mindestens ebenso aufwendigen Verfahren wie CCS.

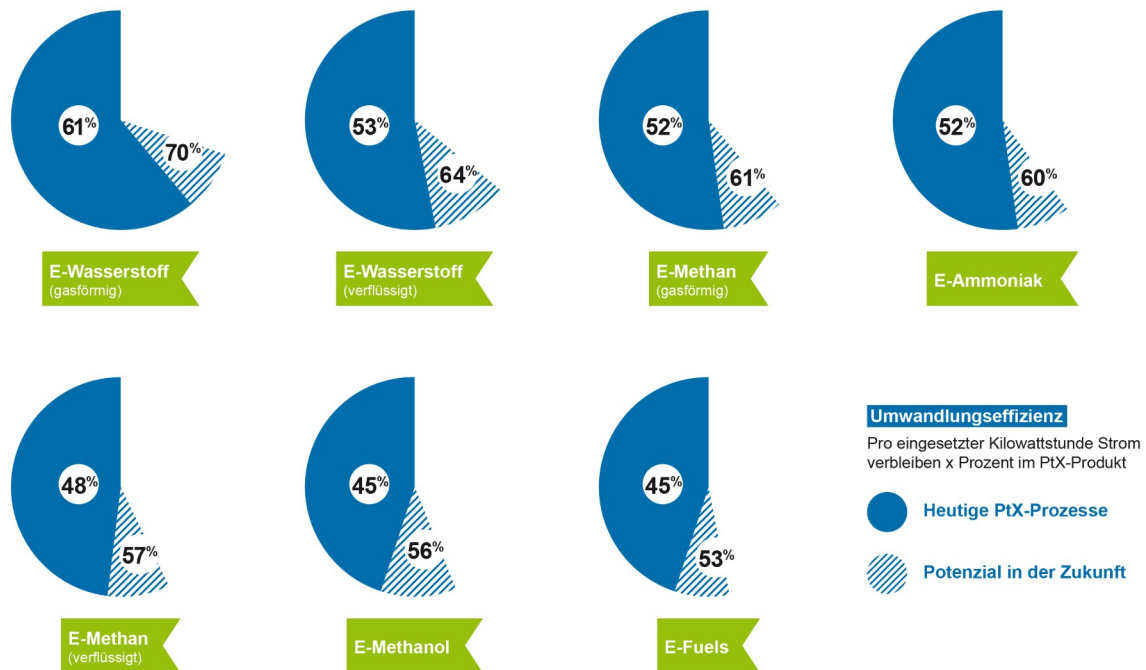
Umwandlung von CO₂ in nützliche Rohstoffe?

Inzwischen werden eine Reihe von Verfahren erforscht oder entwickelt und zumindest im Labor-, teilweise auch schon im Pilotmaßstab getestet, die CO₂ in Rohstoffe umwandeln, wie sie derzeit in der Industrie in nennenswertem Umfang gebraucht werden (Frick 2023).

CO₂, das sehr reaktionsträge ist, soll auf diese Weise als wertvoller Grundstoff dienen; damit soll dann die Wirtschaft "nachhaltig" werden. Kann ein solches Nachhaltigkeits-Versprechen tatsächlich eingelöst werden? Die drastisch ungünstige Energie- und Entropiebilanz bei der Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt. Damit wurde bereits der erste Schritt, die Bereitstellung des CO₂ für chemische Verfahren, als nicht nachhaltig erkannt. Eigentlich kann dann eine weitere chemische Umwandlung nichts mehr zur Verbesserung der negativen Nachhaltigkeitsbilanz beitragen.

Power-to-X: Wie viel vom Strom übrig bleibt

Effizienz bei der Herstellung von Energieträgern aus Strom heute und in Zukunft



QUELLE: ÖKO-INSTITUT 2019, CC BY-SA 2.0

Abb. 8: Grafik des Ökoinstituts „wieviel bleibt vom Strom übrig, wenn Wasserstoff oder e-Fuel erzeugt wird“ (Creative Commons-Lizenz <https://www.flickr.com/photos/oekoinstitut/48705446082/>)

Das scheint auch das Unternehmen Covestra so zu sehen, die nicht nur aus Wirtschaftlichkeitgründen, sondern auch wegen mangelnder Nachhaltigkeit die Polyolproduktion mit CO₂ als Rohstoff u.a. aus Nachhaltigkeitsgründen (die Covestra nicht näher erläuterte) eingestellt haben (Frick 2023). Nachhaltigkeit erfordert nicht nur "Kunden, die einen Aufpreis akzeptieren, um im Bereich der Nachhaltigkeit zu punkten". Denn Nachhaltigkeit entsteht nicht durch schlechtere Wirtschaftlichkeit (die mit höheren Preisen, wenn sie akzeptiert werden, kompensiert werden könnte), sondern nur bei minimaler Entropieproduktion.

Deshalb sollten wir uns nun genauer ansehen, ob eine chemische Nutzung von CO₂ mittels nachfolgender chemischer Prozesse nachhaltig sein kann. Dabei gehen wir nicht auf die einzelnen Reaktionen / Prozesse ein, die in dem oben genannten Artikel beschrieben werden, sondern nehmen eine ganz einfache Reaktion, wie sie von Prof. Benjamin List (Nobelpreisträger 2021 für seine Arbeit auf dem Gebiet der organischen Katalyse) im ZEIT-Magazin vom 11. 5. 2023 in Form einer Frage und einiger Erläuterungen vorgestellt wurde. Das Magazin hatte 12 namhafte Wissenschaftler nach den "großen ungelösten Fragen auf ihrem Gebiet, auf die sie gerne eine Antwort hätten" gefragt. Prof. List fragte: "Können wir den Klimawandel aufhalten, indem wir Kohlendioxid in seine Bestandteile aufspalten?" und den Kohlenstoff dann wieder als Kohle vergraben, zum Beispiel im Ruhrgebiet.

Wenn wir CO_2 wieder in C und O_2 aufspalten wollen, müssen wir *mindestens* die 393 kJ/mol Bildungsenthalpie aufwenden, die bei der Reaktion von C und O_2 zur Bildung von CO_2 im Verbrennungsprozess freigesetzt wurden. "Mindestens" deshalb, weil der Prozess der erneuten Spaltung auch einen Verlust an Effizienz (d. h. weitere Entropieerzeugung) mit sich bringt. Aufgrund des typischen Wirkungsgrads von Kraftwerken haben wir jedoch nur etwa ein Drittel der Bildungsenthalpie, etwa 130 kJ/mol, an Energie zur Verfügung, wenn wir CO_2 produzieren!

Selbst die Katalyse (das Spezialgebiet von Prof. List) kann diese Beziehung nicht ändern, denn ein geeigneter Katalysator kann die Reaktionsenthalpie nicht ändern, sondern nur die Aktivierungsenergie verringern und die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen.

Neben dem Aspekt der miserablen Energiebilanz gibt es auch den Aspekt der Entropie: Diese lässt sich durch den Vergleich der Standardentropiewerte der beteiligten Stoffe abschätzen:

C: 6 J/K* mol , O_2 : 205 J/K* mol ; CO_2 214 J/K* mol ; d.h., wir reduzieren die Entropie von 214 auf 211 J/K* mol (was außerhalb dieses Systems als Entropieerhöhung erscheint); das klingt nicht besonders dramatisch, aber es summiert sich zu der Entropieerhöhung, die für die Bereitstellung von CO_2 für die Aufspaltung in C und O_2 erforderlich ist.

- Und pro Tonne CO_2 sind das schon beachtliche Beträge, nämlich fast 70.000 J/K, und wir haben es nicht mit einer Tonne CO_2 zu tun, sondern mit Milliarden und Abermilliarden von Tonnen, und das bei etwa 293 K (Umgebungstemperatur).

Wenn nun – wie was für eine direkte chemische Nutzung des Kohlendioxids erforderlich ist – CO_2 mittels H_2 reduziert werden soll, ist der Energiebedarf, der Wirkungsgrad und die damit verbundene Entropieerhöhung der Wasserstoffproduktion zum Energiebedarf für die Bereitstellung des CO_2 zu addieren. Es wird nicht nachhaltiger, sondern nur umweltschädlicher, ökologisch sogar absurder. Denn wir können nicht ignorieren, dass CO_2 ein Indikator für großen Entropieanstieg ist – und Entropie kann nur gesenkt werden, wenn außerhalb des offenen Systems (in dem wir die Entropie senken) die Entropie übermäßig ansteigt. Wasserstoff ist nicht umsonst zu haben, weder in Bezug auf Energie noch auf Entropie: Um 1 Tonne Wasserstoff zu erzeugen, benötigt man 40.000 bis 80.000 kWh Strom (Tine Heni, scinexx 2024). Windkraft findet man aber (weltweit betrachtet) laut dieser Quelle zumeist dort, wo Wasser in Trinkwasserqualität (wie für die Elektrolyse von Wasser erforderlich) eher rar ist, oft (in Wüstengebieten) nicht einmal Meerwasser. Die Entsalzung von Meerwasser, wenn es denn zugänglich wäre, erfordert nicht nur weiteren zusätzlichen Strom, sondern verursacht massive Schäden im marinen Ökosystem: Bei der Entsalzung fällt giftige Sole an, zusätzlich verunreinigt durch die im Prozess erforderlichen Chemikalien.



Abb. 9: Erste großindustrielle Wasserstoffproduktionsanlage in China (https://www.fuelcellchina.com/Industry_information_details/109.html)

Er wird oft als "grüner Wasserstoff" bezeichnet, wenn er mit regenerativen Energiequellen hergestellt wird. Die direkte Nutzung dieses Stroms (z. B. für den Antrieb von Elektroautos) ist jedoch wesentlich nachhaltiger als die Umwandlung von Wasser in Wasserstoff, die anschließende Umwandlung von CO₂ in "E-Fuels" und deren Nutzung für den Antrieb von Autos mit Verbrennungsmotoren. Bei allen Schritten ist ein drastischer Effizienzverlust bei der Energienutzung zu berücksichtigen, der der Entropieproduktion entspricht. Sichtbar wird es daran, dass der Energiebedarf zur Herstellung des E-Fuel für eine Fahrstrecke von z. B. 100 km um etwa einen Faktor 10 (!) größer ist, als wenn der Strom aus der Windkraft (oder der PV-Anlage) direkt im Elektroauto verwendet würde (Tine Heni 2024, wobei hier ein Vergleich mit einem Dieselmotor angeführt wird, der etwa 50% mehr Energie benötigt als ein vergleichbares E-Auto). Analog gilt dies für jede Chemikalie, die aus CO₂ unter Verwendung von so genanntem "grünem" Wasserstoff hergestellt wird.

Eine Metastudie über die Umweltaspekte der CO₂-basierten chemischen Produktion (Thonemann 2020) kommt zu dem Schluss, "dass es keine CO₂-basierte chemische Produktionstechnologie gibt, die in jeder IC [impact category, also 'Umweltauswirkungskategorie'] besser abschneidet als die konventionelle Produktionsalternative." Dies dürfte niemanden überraschen, wenn man die Entropiebilanz betrachtet, denn Entropie ist ein Indikator für negative Umweltauswirkungen.

Während Mac Dowell et al. (2017) gezeigt haben, dass die Menge der benötigten Rohstoffe, selbst wenn es theoretisch möglich wäre, alle organischen Rohstoffe der chemischen Industrie irgendwie durch CO₂-basierte Chemikalien (erzeugt über CCU) zu ersetzen, "deutlich macht, wie vernachlässigbar der Beitrag von CCU zur globalen CO₂-Minderungsherausforderung sein wird", folgern Kätelhön et al. (2019) außerdem, wie absurd ein solcher Ansatz wäre: "Die Ausschöpfung dieses Potenzials erfordert jedoch mehr als 18,1 PWh kohlenstoffarmen Stroms, was 55 % der für 2030 prognostizierten globalen Stromerzeugung entspricht." Mit anderen Worten: Um (nur theoretisch gedacht!) bestenfalls 10 % der weltweiten jährlichen CO₂-Emissionen zu beseitigen, bräuhete die chemische Industrie 55 % der weltweiten Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (wie für 2030 prognostiziert). Dies ist, wiederum mit anderen Worten, nichts anderes als eine Manifestation der Entropie.

Bei diesem Strombedarf ist noch nicht berücksichtigt, dass für CCS bzw DAC riesige Anteile der weltweiten Stromerzeugung erforderlich sein wird: Bei der derzeit jährlichen CO₂-Emissionen von etwa 36 Gigatonnen benötigen wir nur für die Stabilisierung der CO₂-Konzentration auf aktuellem Niveau ca 22 PWh an elektrischer Energie (und 72 PWh thermischer Energie). Die für 2030 prognostizierte Gesamtstromerzeugung von ca 33 PWh würde somit zu 2/3 für CCS bzw DAC benötigt werden. Wohlgemerkt: der Gesamtstrombedarf, nicht nur der aus regenerativen Energiequellen. Mit welchem Strom soll dann die weltweite Infrastruktur und Industrie betrieben werden? Es blieben ja nur noch 9 PWh Strom konventioneller zusammen mit regenerativer Erzeugung für das übrig, was heute (2023) knapp 30 PWh erfordert.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass die Entropie kontinuierlich zunimmt, kann nicht außer Kraft gesetzt werden. Ebenso wenig können wir die Tatsache umgehen, dass wir, wenn wir die Entropie in einem bestimmten offenen System (z. B. in der Atmosphäre) verringern oder Materialien mit einem hohen Entropiegehalt (z. B. CO₂) verwenden und somit wiederum Entropie vermindern wollen, eine enorme Menge an Energie investieren müssen, was zu einem Mehrfachen an Entropie im globalen Maßstab führt. Die Naturgesetze können nicht überwunden werden, indem man sie ignoriert.

MIPS, der „Materialinput pro Serviceeinheit“ als Indikator für Entropie

Zugegebenermaßen ist es alles andere als einfach, die Entropieproduktion für komplexe Verfahren und Produkte zu berechnen. Vermutlich ist es nur in seltenen Fällen möglich, wie in den hier gezeigten Fällen vorzugehen und – wie in diesem Fall – über die Mischungsentropie die wesentliche Kennzahl zu erfassen; und auch der Energiebedarf von CCS bzw CCU allein ist schon so groß, dass es nicht erforderlich ist, auch noch den Energie- und Rohstoffbedarf und die damit verbundene Entropieproduktion der für CCS / CCU erforderlichen Anlagen zu berücksichtigen. Die Bilanzen sind schon deutlich genug und zeigen, wie extrem nicht-nachhaltig diese Verfahren sind.

Es mag aber für andere Fälle, für die man die Nachhaltigkeit vergleichen will, sinnvoll sein, Größenordnungen abschätzen zu können, ohne gleich die Entropie berechnen zu müssen. Dabei kann die Kennzahl MIPS helfen.

Der „Materialinput“ (oder auch: die „Materialintensität“) „pro Serviceeinheit“ (MIPS) gibt an, wieviel Tonnen beliebiger Stoffe für die Herstellung, den Gebrauch und die Entsorgung bestimmter Produkte oder den Betrieb von Verfahren erforderlich sind (seien es Bodenaushub, Rohstoffe, Wasser oder welche Stoffe auch immer). MIPS wurde in den 1990er Jahren von Prof. Schmidt-Bleek (Wuppertalinstitut) entwickelt (Schmidt-Bleek 1993, 1997). Diese Betrachtung wurde häufig als zu undifferenziert kritisiert und geriet in Vergessenheit.

Jedoch sollte man sich damit wieder befassen, denn MIPS ist ein sehr guter Indikator für die Entropieproduktion von Verfahren und für Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von Produkten. Das Wuppertal-Institut, das Team um Schmidt-Bleek, hat damals bereits für die meisten Produkte und die dafür verwendeten Rohstoffe MIPS-Kennzahlen erarbeitet. Diese mögen zum Teil einer Aktualisierung bedürfen, aber das Prinzip ist nach wie vor hilfreich und dazu geeignet, das Nachhaltigkeits-Kriterium „Entropie“ verständlicher zu machen.

Schlussfolgerungen

Aber das wird in der öffentlichen Diskussion überhaupt nicht berücksichtigt, auch nicht in der Wissenschaft. Allein die Mischungsentropie (die wir bei der Abtrennung der Gase aus der behandelten Luft "in die Umwelt" exportieren müssen, d.h. bei der Abtrennung des CO₂ von den anderen Bestandteilen der Luft, weil CO₂-ärmere Luft weniger Entropie enthält) ist enorm. Darüber hinaus wird Entropie bei der Bereitstellung der erforderlichen Energie erzeugt. Das mag manchem sehr theoretisch erscheinen, ist es aber nicht: Verarmte Ökosysteme; lebensfeindliche Landschaften; durch Pestizide und Insektizide praktisch leblose Ackerflächen mit, wenn überhaupt, nur einem Zentimeter Humus; Abwärme; Müllberge; Trinkwasserverbrauch (bei der Wasserstofferzeugung), verschmutzte Gewässer und Meere (siehe z. B. die Schäden an marinen Ökosystemen bei der Meerwasserentsalzung); Mikroplastik; Rückgang der Artenvielfalt (Vögel, Insekten!) und vieles mehr sind Zeichen für entropiebedingte Umweltschäden. Weder in Bezug auf Energie noch in Bezug auf Entropie ist die Entsorgung (Endlagerung) oder Nutzung von CO₂ nachhaltig.

Das Klima- und Biodiversitätsproblem kann nur gemeinsam gelöst werden. Es kann nicht erwartet werden, dass ein Artikel wie dieser ein komplettes Konzept für die Lösung dieses komplexen globalen Problems vorlegen kann. Aber es wird keine Lösung geben ohne den entscheidenden

Beitrag der Photosynthese: in möglichst naturnahen, möglichst wild belassenen (oder renaturierten) Ökosystemen, mit weltweit praktizierter ökologischer Landwirtschaft (Schmitz 2023 und Buck-Wiese 2022). Technologie kann uns bei effizienten industriellen Prozessen helfen, nicht aber bei der CO₂-Abscheidung und -Endlagerung. Die chemische Umwandlung von CO₂ in nützliche Stoffe sollte den Pflanzen, Pilzen und Mikroben überlassen werden.



Abb. 10: Monokulturforste sind weder effiziente CO₂-Speicher, noch tragen sie zur Stärkung der Biodiversität bei – im Gegenteil. (Foto: wikimedia commons)

Wälder (Lidong Mo et al., 2023) und Pilznetzwerke (Heidi-Jayne Hawkins et al 2023) bieten eine bisher um Größenordnungen unterschätzte Kapazität für CO₂-Fixierung, jedoch erfordert dies, den natürlichen Prozessen Ruhe, Raum und Zeit zu lassen. Moore können doppelt so viel CO₂ speichern wie alle Wälder der Erde zusammen (Temmink 2022) – obwohl sie nur einen Bruchteil der Fläche erfordern –, dazu müsste man sie „nur“ wiedervernässen; hinzu kommt das Speicherpotential anderer Feuchtgebiete und der küstennahen Seegraswiesen und Kelbwälder.

In der Kombination dieser natürlichen Prozesse liegt die Lösung unserer akuten Umweltprobleme, nämlich zugleich auch der Biodiversitätskrise. In der öffentlichen Diskussion und auch in der Wissenschaft wird oft angenommen, dass Wälder – und das möglichst sogar noch mit schnellwachsenden Bäumen – das beste CO₂-Speicherpotenzial aufweisen. Das ist ein Irrtum, den wir im Rahmen dieses Artikels nicht näher beleuchten können. Direkt verständlich ist aber die Tatsache, dass Monokulturen nichts zur Lösung der Biodiversitätskrise beitragen.

Abb. 11: Ein sich natürlich entwickelnder Mischwald ist eine leistungsfähige Kohlenstoffsенке (nicht zuletzt auch wegen des unterirdischen Pilznetzwerks), besonders dann, wenn es Lichtungen gibt, die von Wiederkäuern beweidet werden; ganz abgesehen von seinen Beiträgen zur Biodiversität, Wasserhaushalt und Luftqualität. (Foto: Commons Wikipedia)



Abb. 12: Moore haben eine noch größere Kapazität als Kohlenstoffsенке, während trockengelegte Moore in großem Umfang CO₂ emittieren. Und auch sie sind, wie alle anderen Feuchtgebiete, unerlässlich für die Biodiversität, nicht zuletzt wegen ihrer keineswegs monotonen inneren Strukturen und ihrer komplexen natürlichen Umgebung. (Foto: Creative Commons License)

Wenn sonst bisher bei anderen Autoren von Nachhaltigkeit die Rede war und versucht wurde, sich quantitativen Kriterien zu nähern, beschränkte sich dies zumeist auf "1) Exergiebilanz 2) Verhältnis oder Anteil der erneuerbaren Energien, ausgedrückt als Exergien 3) Strukturkosten in Form von Exergie" (Nielsen 2020, S. 234; "Exergie" wird als "für die Verrichtung von Arbeit nutzbare Energie" verstanden). Entropie wurde bisher nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch unvermeidlich, da auch (z. B.) erneuerbare Energie nicht zur Verfügung steht, ohne viel Entropie erzeugt zu haben.

Letztlich könnte allein die Entropie als Schlüsselkriterium für Nachhaltigkeit angesehen werden. Alle Prozesse, die der Mensch betreibt, sollten zusammen mit den natürlichen Produzenten in der

Summe nicht mehr Entropie erzeugen, als die Erde abstrahlen kann (das sind etwa 230 W/m² der Erdoberfläche, Ebeling / Feistel 2017). Davon sind wir weit entfernt, was bedeutet: Wir erzeugen viel mehr Entropie, als die Erde abstrahlen kann; folglich sammelt sich Entropie auf der Erde an - wo sonst könnte sie auch landen? Wir können uns also nur dann einem viel nachhaltigeren Niveau des Lebens und des Managements unserer Wirtschaft, unserer Landwirtschaft und unserer Ökosysteme nähern, wenn wir damit beginnen, die Analyse der Entropieerzeugung für unsere industriellen Produkte und Prozesse, einschließlich der landwirtschaftlichen Verfahren, einzuführen. Das muss auch für Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels und zur Lösung der Biodiversitätskrise geschehen.

Bibliographie

Bertalanffy, Ludwig von, in: "Allgemeine Systemtheorie, herausgegeben von George Braziller, N. Y. 1968, S. 191".

Bundesamt für Naturschutz: Klimaschutz - Moore als Kohlenstoffspeicher und THG-Quelle.
<https://www.bfn.de/oekosystemleistungen-0#anchor-3817>

Buck-Wiese, Hagen; Andskog, Mona; Ngyen, Ngyen; Hehemann, Jan-Hendrik; „Fucoid brown algae inject fucoidan carbon into the ocean“, PNAS 120 (1) e2210561119 (2022), siehe <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2210561119> (20. 1. 2024)

Ebeling, Werner; Feistel, Rainer; "Self-Organization in Nature and Society", Konferenz "The Human World: Uncertainty as a Challenge", Frolov Lectures 2017, abgerufen hier: https://www.researchgate.net/publication/316878591_Selbstorganisation_in_Natur_und_Gesellschaft_und_Strategien_zur_Gestaltung_der_Zukunft, siehe auch Feistel, R., Ebeling, W., "Physik der Selbstorganisation und Evolution", Wiley-VCH 2011, S. 97/98.

eFuel-Today <https://efuel-today.com/en/production-process-of-e-fuels/> (20. 1. 2024)

EURACTIV: <https://www.euractiv.com/section/energy/opinion/analysis-efficiency-of-coal-fired-power-stations-evolution-and-prospects/>

Fasihi, Mahdi; Efimova, Olga; Breyer, Christian; „Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants“, J. Cleaner Production, 224, S. 957-980, siehe <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619307772> (20. 1. 2024)

Frick, Frank, "Heute Übeltäter, morgen Held", Bild der Wissenschaft Spezial: Rohstoffe (Sommer 2023), S. 78 ff.

Heidi-Jayne Hawkins et al, „Mycorrhizal mycelium as a global carbon pool“, Current Biology 33, R560–R573, Juni 2023

Heni, Tine, „Der ewige CO₂-Kreislauf“, [scinexx](https://www.scinexx.de/dossierartikel/der-ewige-co2-kreislauf/) (23. 2. 2024), <https://www.scinexx.de/dossierartikel/der-ewige-co2-kreislauf/>

Kätelhön, Arne; Mays, Raoul, Deutz, Sarah; Bardow, André; „Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry“ PNAS 116 (23) 11187-11194 (2019), siehe <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1821029116> (20. 1. 2024)

Lane, Joe; Greig, Chris; Garnett, Andrew, „Uncertain storage prospects create a conundrum for carbon capture and storage ambitions“ Nature Climate Change 11, 925–936 (2021) siehe <https://www.nature.com/articles/s41558-021-01175-7> (20. 1. 2024)

Lidong Mo et al., „Integrated global assessment of the natural forest carbon potential“ nature, Nov. 2023

Mac Dowell, Nigel; Fennell, Paul; Shah, Nilay; Maitland, Geoffry; „The role of CO₂ capture and utilization in mitigating climate change“ Nature Climate Change 7, 243–249 (2017), siehe <https://www.nature.com/articles/nclimate3231> (20. 1. 2024)

Morris, Stephen, 2009 Fotos und Videos zeigen eine typische Reaktionssequenz:

<https://www.flickr.com/photos/nonlin/3572095252/in/album-72157623568997798/> (20. 1. 2024);

Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Stephen Morris (Univ. of Toronto, Canada) und Mike Rogers.

Nielsen, Soeren Nors., Fath, Brian., et al, A New Ecology Systems Perspective, 2nd edition, Elsevier Amsterdam, 2020

Nobel Prize Committee <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/press-release/> (20. 1. 2024) mit Links zu weiteren Quellen

Sellnacht Lexikon <https://www.seilnacht.com/Lexikon/dhtabell.htm> (20. 1. 2024)

Schmidt-Bleek, Friedrich: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Faktor 10 - Das Maß für ökologisches Wirtschaften. Birkhäuser, 1993; DTV, München 1997

Schmitz, Oswald et. al., „Trophic rewilding can expand natural climate solutions“, Nature Climate Change 13, 324–333 (2023), siehe <https://www.nature.com/articles/s41558-023-01631-6> (20. 1. 2024)

Temmink, Ralph, et al., „Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world’s biotic carbon hotspots“, Science 2022, Vol 376, Issue 6593, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abn1479> (6. 2. 2024)

Thonemann, Nils, „Environmental impacts of CO₂-based chemical production: A systematic literature review and meta-analysis“, Appl. Energy 263, 114599 (2020), siehe <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920301112> (20. 1. 2024)

Universität Freiburg

<https://www.experimente.physik.uni-freiburg.de/Thermodynamik/waermeleitungundkonvektion/konvektion/> (20. 1. 2024) ; Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Fakultät für Physik der Universität Freiburg.

Universität Ulm: <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk2-2007/node31.html> (20. 1. 2024)

Weßling, Bernhard, „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“, SpringerNature 2022, das (zusammen mit der englischen Ausgabe „What a Coincidence“, ebenfalls bei SpringerNature , 2023) wohl weltweit erste populärwissenschaftliche Buch, das in die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik einführt.

Weßling, Bernhard, „Zuall und Komplexität sind Geschwister“, NR 9-2023, S. 484 ff

Zhao, Yong et al., „Conversion of CO₂ to multicarbon products in strong acid by controlling the catalyst microenvironment“, [Nature Synthesis](#) 2, 403–412 (2023),
siehe <https://www.nature.com/articles/s44160-022-00234-x> (20. 1. 2024)
<https://actionaidrecycling.org.uk/carbon-capture-utilisation-and-storage-effects-on-climate-change/>
(20. 1. 2024); für eine allgemeine Beschreibung siehe Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_storage (20. 1. 2024), oder
<https://www.globalccsinstitute.com/> (20. 1. 2024),
https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_capture_and_utilization (20. 1. 2024)

Dr. **Bernhard Weßling** ist Chemiker, Unternehmer, Naturforscher. In einem Leben voller Komplexität wechselte er sehr früh von der Naturstoff- in die Polymerchemie, darin zu leitfähigen Polymeren und in kolloidale Systeme, Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik und Turbulenzphysik. Sehr früh ging er unternehmerische Risiken ein, die ihn für 15 Jahre nach China brachten. Nebenher betrieb er ehrenamtlich (ohne Amt, auch international) Kranichforschung und trug zu mehreren Artenschutzprojekten aktiv bei; seit 2009 betreibt er Artenschutz und Klimastabilisierung als Investor und Geschäftsführer in einem inzwischen großen Biohof (450 ha Pachtland, 7 eigene Hofläden, 90 Mitarbeiter). Über seine Arbeiten publizierte er drei Bücher: „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“, „Der Ruf der Kraniche“ (beide auch auf englisch erschienen) und „Mein Sprung ins kalte Wasser“.
www.bernhard-wessling.com