



Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit – CO₂-Endlagerung bzw. -Nutzung (CCS/CCU) nicht nachhaltig

Bernhard Wessling (Jersbek)

Veröffentlicht: 20. März 2024

Abstract

The principles of non-equilibrium thermodynamics are briefly discussed, with a focus on entropy. For the first time, the energy consumption and entropy production of CO₂ final storage and utilization (CCS and CCU) are quantitatively investigated and interpreted. This shows that final storage and chemical use of CO₂ are not sustainable processes for solving the climate crisis. Building on this, a new proposal for a quantitative criterion for sustainability is presented: Entropy.

Resümee

Die Grundsätze der Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik 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: Entropie.

Keywords/Schlüsselwörter

Non-equilibrium thermodynamics, entropy, sustainability, climate change mitigation, carbon capture, CCS, carbon utilization, CCU

Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik, Entropie, Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Kohlenstoffabscheidung, CCS, Kohlenstoffnutzung, CCU

1 Einführung

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 Nichtgleichgewichtsthermodynamik. 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. Hier werden einige erste (auch quantitative) Versuche zur Überbrückung dieser Lücke 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- und CCU-Prozessen entwickeln.

2 Kurzer Überblick: Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik und dissipative Strukturen

Die Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik wurde grundlegend von Ilya Prigogine entwickelt, wofür er 1977 den Nobelpreis erhielt (Nobel Prize Committee 1977). Er beschrieb zum ersten Mal die Selbstorganisation zu komplexen Strukturen: „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.

Besonders anschaulich wird dies bei der Betrachtung von Bénard-Zellen (Abb. 1). 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.



Abb. 1: Bénard-Zellen (Universität Freiburg 2024)

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 (Abb. 2).



Abb. 2: Screenshot eines Videos, das den Ablauf der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion zeigt (Morris 2009)

Prigogine zufolge ist dies darauf zurückzuführen, dass ein überkritischer Energieeintrag ein offenes System in einen Zustand fernab des Gleichgewichts zwingt und Entropie exportiert. Und dies ist der entscheidende Punkt, der das herkömmliche, auf der klassischen Gleichgewichtsthermodynamik 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 Ordnungsgrad ist nach Boltzmanns statistischer Interpretation identisch mit einem geringeren Entropiegehalt.¹ Je niedriger die Entropie, desto komplexer die

¹ In einigen Abhandlungen und Büchern wird anstelle des Begriffs „Entropieexport“ der Begriff „negative Entropie“ verwendet; er wurde ursprünglich von Erwin Schrödinger eingeführt, als er schrieb: „Lebende Materie entzieht sich dem Zerfall zum Gleichgewicht. Sie ernährt sich von 'negativer Entropie'“ und verwendet diesen Begriff mehrfach, auch wenn er sagt, dass ein Organismus nur am Leben bleiben kann, indem er „seiner Umgebung [negative Entropie] entzieht“ (E. Schrödinger, *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell; With Mind and Matter; & Autobiographical Sketches*; Cambridge University Press 1944.). Ich bevorzuge den Ausdruck „Entropieexport“, der später von Ilya Prigogine eingeführt wurde, denn in Wirklichkeit entsteht Entropie bei den verschiedenen Prozessen *innerhalb* eines offenen Systems wie einem Organismus (d.h., in den Zellen dieses Organismus) und würde sich dort ansammeln, wenn sie nicht exportiert würde; exportiert durch die Abstrahlung von Niedertemperaturwärme und durch den „Export“ von Abfallstoffen; „Abfall“ bedeutet „nicht nützlich für die genannten Zellprozesse“, wie Sauerstoff im Falle der Photosynthese von Pflanzen, CO₂ im Falle der Atmung von Tieren, auch Hautschuppen, Urin oder Kot.

Ordnung: Ein regelmäßiger Kristall hat eine höhere Entropie als eine Eichenkrone, weil in beliebig kleinen oder beliebig großen benachbarten Volumensegmenten, die zu vergleichen sind, die Systemelemente (hier: die Zellen, die Äste und Rinde bilden) alle an einem anderen Ort sind.

Der Grund dafür ist die Tatsache, dass in allen solchen Nicht-Gleichgewichtssystemen 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.

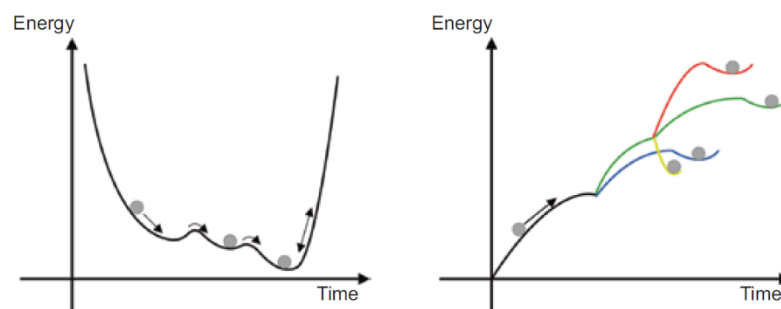


Abb. 3: Hier wird schematisch der prinzipiell unterschiedlichen Verlauf von reversiblen Prozessen gezeigt, die zu einem Gleichgewichtszustand führen (links), bzw. in einem Nicht-Gleichgewichtssystem (rechts) mit irreversiblen Prozessen.

Die (freie) Energie im Gleichgewicht tendiert zu einem Minimum, und entsprechende Prozesse treten spontan auf, sind reversibel, und die Entropie erreicht ein Maximum. Ganz anders bei Nicht-Gleichgewichtszuständen: Der Energiezufluss ist mehr oder weniger kontinuierlich, die Entropie erreicht niedrigere Werte, und nach einigen Bifurkationsereignissen können relativ stabile Zustände erreicht werden, die aber meist dem Zerfall unterliegen, wenn sie nicht durch weiteren Energiezufluss stabilisiert werden, Prozesse und dissipative Strukturbildung sind irreversibel. Allerdings führt der ggf. stattfindende Zerfall nicht zu einem Zustand, der mit dem Beginn der Prozessfolge identisch ist, das ist unmöglich.

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-Gleichgewichtsthermodynamik beschrieben werden können: Aus offenen dynamischen Systemen wird ständig Entropie exportiert (letztlich ins Universum, dort vermutlich in Schwarze Löcher), und die Prozesse verhalten sich nichtlinear und interagieren auch noch nichtlinear miteinander. Komplexität und Zufall sind also sehr eng miteinander verbunden. Nicht-Gleichgewicht ist das, was uns am Leben erhält, „Gleichgewicht ist Zerfall und Tod“.²

² Im Original lautet das Zitat: „Biologisch gesehen ist das Leben nicht die Aufrechterhaltung oder Wiederherstellung des Gleichgewichts, sondern im Wesentlichen die Aufrechterhaltung von Ungleichgewichten, wie

3 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, sie ist an den Universitäten schon fast nicht mehr präsent, sie wird in Thermodynamik-Lehrbüchern auf kaum mehr als 20 Seiten nur sehr kurz behandelt, während die Gleichgewichtsthermodynamik auf den übrigen 900 Seiten steht. Und das, obwohl es in der Realität, abgesehen z. B. von Zuckerwasser und mit Wasser verdünntem Alkohol, kaum Gleichgewichtssysteme und -prozesse gibt, sondern die überwiegende Mehrheit Nicht-Gleichgewichtssysteme und -prozesse sind: Wetter, Klima, Leben, Ökosysteme, Wirtschaft, um nur einige zu nennen. In der chemischen Forschung und in der industriellen Praxis finden ausschließlich Nicht-Gleichgewichtsprozesse statt. Im Gegensatz zu den anderen drei grundlegend wichtigen Theoriegebäuden ist die Nichtgleichgewichtsthermodynamik auch kein Thema im Schulunterricht. Und 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 Nichtgleichgewichtsthermodynamik oder Entropie fast vollständig scheitern.³

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, dass „den Erfordernissen des gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts“ Rechnung getragen wird.⁴ 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).

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.

die Lehre vom Organismus als offenem System zeigt. Das Erreichen des Gleichgewichts bedeutet Tod und konsequenten Zerfall“ (Ludwig von Bertalanffy 1968). Bertalanffy ist der Schöpfer des Begriffs „Fließgleichgewicht“, das überhaupt kein Gleichgewicht ist, sondern ein Nicht-Gleichgewichtssystem, wie er ja selbst schrieb.

³ Das Buch „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“ (Weßling 2023) ist ein erster Versuch, diese Lücke in einer sehr leicht verständlichen und erzählerischen Form zu füllen.

⁴ Art. 109, Abs. 2 des Grundgesetzes lautet (vom Autor übersetzt und hervorgehoben): „Bund und Länder erfüllen gemeinsam die sich aus Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaft auf Grund des Artikels 104 des Vertrages zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft ergebenden Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland zur Einhaltung der Haushaltsdisziplin und tragen in diesem Rahmen den *Erfordernissen des gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts Rechnung.*“

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“ (eFuel-Today 2024).

Über die verschiedenen technologischen Versuche wird keineswegs kritiklos berichtet, sondern 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), und diese Energieumwandlung erzeugt auch eine Menge Entropie.

3.1 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 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 (Abschnitt 3.2).

3.1.1. 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 entspricht -8,9 Millionen kJ Bildungsenthalpie (molar -393) (Sellnacht 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 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 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 wird.

Insgesamt sind 16 Mio. kJ erforderlich, was fast doppelt so viel ist wie die CO₂ Bildungsenergie, also ist der Energieeinsatz etwa viermal so hoch wie die Menge an Exergie (die verfügbare nutzbare Energie), die zur Bildung dieser besagten 1 Tonne CO₂ geführt hat.

Das Argument, dass man regenerative Energie aus den heißen vulkanischen Tiefen Islands oder Solarzellenanlagen in der Wüste nutzt, zieht nicht, denn man könnte einfach

Strom daraus machen 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, während wir noch lange nicht genug erneuerbare Energie haben.

3.1.2. 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, die wir auch nicht haben, aber es reicht, diese Vereinfachungen anzunehmen, 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 $380.000 \cdot 1,5 = 570.000$ 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 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$) $2,76 \cdot 22,727 \cdot \ln((N + N_{\text{CO}_2 \text{ air}}) / N_{\text{CO}_2}) + 2,76 \cdot 570,000 \cdot \ln((N + N_{\text{CO}_2 \text{ air}}) / N_{\text{air}}) = 2,76 \cdot 22,727 \cdot 3,26 + 2,76 \cdot 570,000 \cdot 0,039 = 265.843 \text{ J/K}$

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 viel Energie investiert wird (wir haben bereits gesehen, wieviel benötigt wird: *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 ihn 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 Unordnung zunimmt.

Wir verursachen eine zweifache Entropiezunahme, indem wir die Entropie des Gemischs aus der absorbierten Luft exportieren (nach außen) und indem wir die

Prozessenergie bereitstellen. Also wird irgendwo auf der Erde die Unordnung zunehmen, Unordnung ist Abnahme der Komplexität. 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 allem elektrischen, elektronischen und mechanischen Drum und Dran, 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 nicht mehr zur Verfügung steht. Die Verschlechterung der biologischen Vielfalt ist ein Indikator für die Zunahme der Entropie, die „Entropieverschmutzung“.

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 1,033 Milliarden Barrel (MMbbl) CO₂ pro Tag betragen müssten, wenn nur die weltweite CO₂-Tagesproduktion aufgefangen werden müsste. Die derzeitige weltweite Ölproduktion wird mit 87 bis 91 MMbbl 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 eine Industrie aufgebaut werden müsste, „die wesentlich größer ist als die globale Ölindustrie“ [innerhalb von nunmehr nur 25 Jahren], während der Umfang der heutigen globalen Ölindustrie innerhalb eines ganzen Jahrhunderts aufgebaut wurde. (Eine Analyse des Energiebedarfs solcher Technologien wurde von den Autoren nicht vorgenommen.)

3.2. Umwandlung von CO₂ in nützliche Rohstoffe?

In einem Artikel in einem deutschen Wissenschaftsmagazin wurde eine Reihe von Verfahren vorgestellt, die derzeit erforscht oder entwickelt und zumindest im Labor-, teilweise auch schon im Pilotmaßstab getestet werden (Frick 2023).

CO₂, das sehr träge ist, werde „bald“ ein wertvoller Rohstoff sein; es wird der Eindruck erweckt, es brauche nur ein paar technische Optimierungen und ein paar weniger kostenbewusste Kunden, und CO₂ könne der Atmosphäre entzogen und massenhaft als Rohstoff genutzt werden. Und dann würde die Wirtschaft „nachhaltig“ werden.

(Die drastisch ungünstige Energie- und Entropiebilanz bei der Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre wurde bereits in 3.1 aufgezeigt).

Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit wurde erwähnt, auch als Beispiel, dass Covestra die Polyolproduktion mit CO₂ als Rohstoff u.a. wegen Nachhaltigkeitsaspekten eingestellt habe, aber, so der Autor, man brauche nur „Kunden, die einen Aufpreis akzeptieren, um im Bereich der Nachhaltigkeit zu punkten“. Es wurde nicht dargelegt, welche Argumente Covestra dazu bewogen haben, das Produkt „aus Nachhaltigkeitsgründen“ einzustellen.

Deshalb wollen wir uns nun genauer ansehen, was diese Gründe sein könnten. 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 „Organische 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 aufspalten²“ und den Kohlenstoff dann wieder als Kohle vergraben, zum Beispiel im Ruhrgebiet, sagte er.

Wenn wir CO₂ wieder in C und O₂ aufspalten wollen, müssen wir mindestens die 393 kJ/mol Bildungsenthalpie aufwenden, die bei der Reaktion von C und O₂ zur Bildung von CO₂ 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 die Hälfte der Bildungsenthalpie, etwa 200 kJ/mol, an Energie zur Verfügung, wenn wir CO₂ 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}, O₂: 205 J/K*^{mol}; CO₂ 214 J/K*^{mol}⁴; 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 der Energie zur Aufspaltung von CO₂ in C und O₂ erforderlich ist. - Und pro Tonne CO₂ sind das schon beachtliche Beträge, nämlich fast 70.000 J/K, und wir haben es nicht mit einer Tonne CO₂ zu tun, sondern mit Milliarden und Abermilliarden von Tonnen, und das bei etwa 293 K (Umgebungstemperatur).

Wenn nun – wie im Artikel von Dr. Frick dargestellt – CO₂ mit H₂ umgewandelt werden soll, ist der Energiebedarf und die damit verbundene Entropieerhöhung der Wasserstoffproduktion hinzuzurechnen. Es wird nicht nachhaltiger, sondern nur umweltschädlicher, ökologisch sogar absurder. Denn es ist einfach so, dass CO₂ 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. 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. Das Gleiche gilt 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 ist nicht überraschend, wenn man die Entropie 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, bräuchte 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.

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, der besagt, dass die Entropie kontinuierlich zunimmt, kann auf globaler Ebene 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 wollen, eine enorme Menge an Energie investieren müssen, was zu enormen Mengen an Entropie im globalen Maßstab führt. Die Naturgesetze können nicht überwunden werden, indem man sie ignoriert.

4 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.¹³ Darüber hinaus wird Entropie durch die Bereitstellung der erforderlichen Energie erzeugt. Das mag manchen sehr theoretisch erscheinen, ist es aber nicht: Verarmte Ökosysteme; lebensfeindliche Landschaften; durch Pestizide und Insektizide praktisch tot gemachte Ackerflächen mit, wenn überhaupt, nur einem Zentimeter Humus; Abwärme; Müllberge; verschmutzte Gewässer und Meere; Mikroplastik; Rückgang der Artenvielfalt (Vögel, Insekten!) und vieles mehr sind Zeichen von Entropie-„Verschmutzung“. 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 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.

Wenn bisher von Nachhaltigkeit die Rede war und versucht wurde, sich quantitativen Kriterien zu nähern, beschränkte sich dies auf „1) Exergiebilanz 2) Verhältnis oder Anteil der erneuerbaren Energien, ausgedrückt als Exergien 3) Strukturkosten in Form von Exergie“.⁵ Die Entropie wird noch gar 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 2017). Davon sind wir weit entfernt,

⁵ Vgl. Nielsen 2020, S. 234; „Exergie“ wird als „für die Verrichtung von Arbeit nutzbare Energie“ verstanden

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, einschließlich der Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels und zur Lösung der Biodiversitätskrise.

Bibliographie

- Bertalanffy, Ludwig von, in: „Allgemeine Systemtheorie, herausgegeben von George Braziller, N. Y. 1968, S. 191“.
- Buck-Wiese, Hagen; Andskog, Mona; Ngyen, Ngyen; Hehemann, Jan-Hendrik; „Furoid brown algae inject fucoïdan 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.
- 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)
- Mac Dowell, Nigel; Fennell, Paul; Shah, Nilay; Maitland, Geoffrey; „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)

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)

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 2023

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)

Danksagung

Der Autor ist Grégoire Nicolis (einem guten Freund von Ilya Prigogine, seinem Mitautor und Nachfolger auf dem Lehrstuhl an der Universität Brüssel) und Werner Ebeling (einem weiteren guten Freund von Ilya Prigogine) sehr dankbar, dass sie sich viel Zeit für eine sehr konstruktive Diskussion meiner speziellen thermodynamischen Nichtgleichgewichtstheorie für Dispersionen und Emulsionen (kolloidale Systeme) genommen haben, die einen Beitrag zur allgemeinen Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik von Ilya Prigogine darstellt. Diese Diskussionen haben ihm sehr geholfen, immer tiefer in diese so wichtige Theorie einzusteigen. Dank gebührt auch dem Verlag SpringerNature, dessen verantwortliche Herausgeber der Veröffentlichung von „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“ (2022), ein erstes populärwissenschaftliches Buch, das in die Grundlagen dieser Theorie einführt.

E-Mail-Adresse des Verfassers: bernhard@bernhard-wessling.com