

Aufklärung 2.0: Der (einst) vitale Planet

Der (einst) vitale Planet

Autor: Henrik Nordborg

Datum: 22. Januar 2024

Es gehört zum Schwierigsten, was einem denkenden Menschen auferlegt werden kann, wissend unter Unwissenden den Ablauf eines historischen Prozesses miterleben zu müssen, dessen unausweichlichen Ausgang er längst mit Deutlichkeit kennt. Die Zeit des Irrtums der anderen, der falschen Hoffnungen, der blind begangenen Fehler wird dann sehr lang.

Carl J. Burckhardt (1891 – 1974)

Warum werden gerade diejenigen Wünsche, die sich auf Irrtümern gründen, in uns übermächtig? Nichts haben sie mir später mehr übergenommen als meine Weigerung, mich ihrem fatalen Wunschentzücken hinzugeben.

Christa Wolf, Cassandra

1 Vorwort

Die Menschheit zerstört gerade den einzigen bewohnbaren Planeten im uns bekannten Universum. Obwohl das Problem und seine Ursachen seit mindestens einem halben Jahrhundert bekannt sind, weigern wir uns, etwas dagegen zu unternehmen. Das selbstmörderische Verhalten scheint alternativlos zu sein; keine Nation verfolgt heute eine Politik, die mit der Verbesserung der Lebensbedingungen ihrer Bevölkerung vereinbar wäre und der Lebensstandard weltweit ab. Wie Lemminge marschieren wir dem Untergang entgegen.



Abbildung 1 Der (einst) vitale Planet (Quelle: Shutterstock)

Eigentlich sollte uns das nicht überraschen. Das Verhalten, das in früheren Zeiten zum Zusammenbruch von Hochkulturen geführt hat, ist von Wissenschaftlern wie Jared Diamond und Joseph F. Tainter verstanden und dokumentiert worden [1,2]. Auch in der Vergangenheit

haben die Menschen nicht verstanden, dass Probleme niemals mit der gleichen Denkweise gelöst werden können, die zu ihrer Entstehung geführt hat.

Es gibt dafür eine einfache Erklärung. Der Mensch lernt aus Erfahrungen, die nicht nur unser Wissen, sondern auch unser Denken bestimmen. Sie bilden das Fundament unserer Intuition, die uns ermöglicht, einigermaßen korrekte Entscheidungen schnell zu treffen, ohne den Verstand zu beanspruchen. Der Tennisspieler weiss aus Erfahrung, wie er den Ball zu schlagen hat, der Schreiner wie dick das Holzbrett sein muss und der Bäcker wie viel Mehl er braucht. Wer viel Erfahrung hat, muss nicht lange nachdenken.

Dies kann aber zum Problem werden, wenn sich die Welt so schnell verändert, dass die Erfahrung zu falschen Entscheidungen führt. Ein Bauer im Mittelalter konnte das Klima besser vorhersagen als die Klimaforscher heute. Nicht weil er besonders schlau war, sondern weil er sich an vorhergehende Jahre zurückerinnern konnte und das Klima sich nicht änderte. Heute ist dies nicht mehr der Fall, da die mittlere Jahrestemperatur in einem Land wie der Schweiz um etwa 0.5 °C pro Dekade ansteigt (vgl. Abbildung 2) [3]. Die alten Bauernregeln gelten heute nicht mehr.

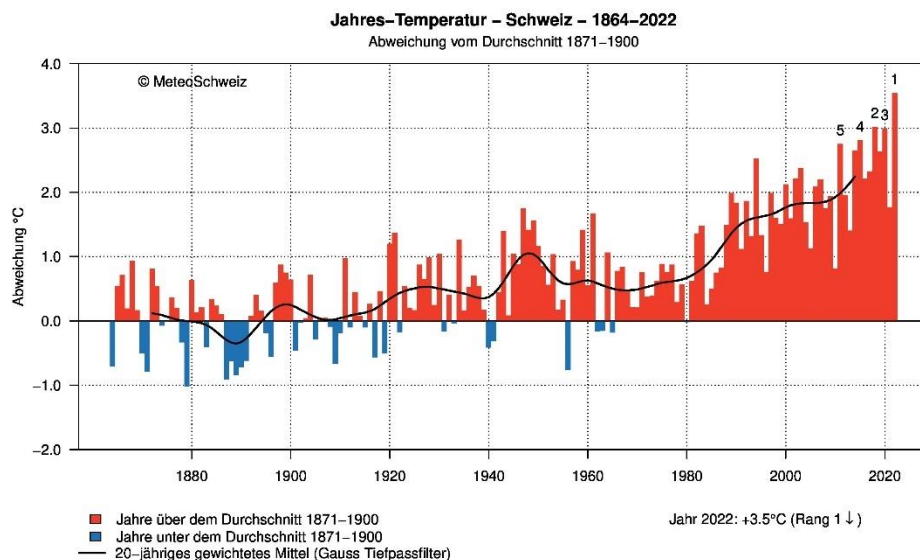


Abbildung 2 Entwicklung der Durchschnittstemperaturen der Schweiz. Quelle: MeteoSchweiz, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>

Festgelegte Denkmuster zu verändern ist schon für Individuen schwierig. Bei komplexen und vernetzten Gesellschaften kommt das Problem hinzu, dass dafür etablierte Machtstrukturen aufgebrochen werden müssen. Dem Papst im 17. Jahrhundert war es wohl ziemlich egal, ob die Erde das Zentrum des Universums ist oder nicht. Er hat aber zu Recht die Wissenschaft als Bedrohung für die Machtposition der Kirche identifiziert und entsprechend gehandelt. Ähnlich haben die Ölkonzerne die Verbreitung des Wissens über den Klimawandel verhindert, obwohl sie selbst alles längst wussten. «Es ist schwierig jemandem etwas zu erklären, wenn sein Gehalt davon abhängt, dass er es nicht versteht», wie es Upton Sinclair so treffend formuliert hat.

In einer sich schnell verändernden Welt versagt unsere Intuition. Es genügt dann nicht mehr, etwas zu wissen, sondern wir müssen auch wissen, warum wir es wissen. Nur wenn unsere Erkenntnisse auf allgemeingültigen Gesetzen basieren, werden sie auch künftig relevant sein. Die Naturgesetze sind deshalb so wichtig, weil sie unabhängig von Politik, Wirtschaft und dem Zustand des Planeten gelten. Sie sind auf dem Mars und auf dem Mond genauso gültig wie auf der Erde und werden auch nach der Klimakatastrophe unsere Welt beschreiben.

Damit möchte ich nicht sagen, dass die globalen Herausforderungen allein durch die Naturwissenschaft bewältigt werden können. Die Rettung der Menschheit ist eine transdisziplinäre Aufgabe, die viele unterschiedliche Kompetenzen benötigt. Die Naturwissenschaft legt aber

die Grenzen des Möglichen fest. Es macht keinen Sinn, die Wissenschaft damit zu beauftragen, ein *Perpetuum Mobile* zur Lösung der Klimakrise zu entwickeln, da wir alle wissen, dass dies nicht funktionieren würde. Politik und Wirtschaft haben deshalb den Begriff *nachhaltiges Wachstum* entwickelt, um das Missachten der Naturgesetze verordnen zu können.

Wir leben heute in einer Gesellschaft, die vorhandenes Wissen bewusst ausblendet, um bestehende Machtstrukturen zu rechtfertigen. Offensichtliche Tatsachen, wie der Zusammenhang zwischen der Nutzung fossiler Brennstoffe und dem Klimawandel oder die Unmöglichkeit des unbegrenzten Wachstums auf einem endlichen Planeten, werden aus politischen Überlegungen in Frage gestellt. Wissenschaftliche Studien belegen auch, dass die Menschen seit 40 Jahren immer irrationaler werden [4]. Mit der Wahl Ronald Reagans zum Präsidenten der USA wurde wohl die Dummheit zum politischen System.

Gemäss Orwell werden Gesellschaften dann totalitär, wenn ihre Strukturen artifiziell geworden sind und sich die nutzlose herrschende Klasse nur durch Gewalt und Betrug an der Macht halten kann [5]. Dafür müssen Presse- und Redefreiheit eingeschränkt und akademische Institutionen stärker politisch kontrolliert werden. Statt kritisch denkender Menschen soll «ein Geschlecht erfinderischer Zwerge» (Bertholt Brecht) ausgebildet werden, die zu «willigen Werkzeugen in den Händen von Politikern und Fürsten» (Alexander von Humboldt) werden wollen. Unsere planetare Krise ist somit nicht nur eine Krise der Politik, sondern auch eine Krise der Wissenschaft.

Ja, ich glaube an die sanfte Gewalt der Vernunft über die Menschen. Sie können ihr auf die Dauer nicht widerstehen. Kein Mensch kann lange zusehen, wie ich [...] einen Stein fallen lasse und dazu sage: er fällt nicht. Dazu ist kein Mensch imstande. Die Verführung, die von einem Beweis ausgeht, ist zu groß. Ihr erliegen die meisten, auf die Dauer alle. Das Denken gehört zu den größten Vergnügungen der menschlichen Rasse.

Bertolt Brecht, Leben des Galilei

Mit diesem Artikel möchte ich an die «sanfte Gewalt der Vernunft» appellieren. Ich werde zeigen, dass wir heute aus thermodynamischer Sicht auf einem *sterbenden Planeten* leben, der aber noch gerettet und in den Zustand eines *vitalen Planeten* zurückgeführt werden kann. Die dafür notwendigen Massnahmen werden aber heute als politisch undurchführbar erachtet, weshalb sich die Wissenschaft vor allem mit Palliativpflege beschäftigt. Es geht darum, den Patienten so lange am Leben zu erhalten und die Menschen zu beruhigen, bis die Politiker wiedergewählt sind. Kritische Fragen sind nicht erwünscht.

«Wir lernen Naturwissenschaften, um nicht verarscht zu werden», hat Harald Lesch gesagt. Die Naturgesetze können wir nicht ändern und es ist deshalb höchste Zeit, sie ernst zu nehmen.

2 Einführung in die Thermodynamik

Ironischerweise war wohl die Dampfmaschine der Auslöser für die Erfindung der Thermodynamik im 19. Jahrhundert. Ingenieure waren mit der Frage konfrontiert, wie Wärme in Arbeit umgewandelt werden kann. Es war offensichtlich, dass eine Dampfmaschine nicht nur Arbeit erzeugt, sondern auch viel unerwünschte Abwärme. Das Gleiche gilt für die Verbrennungsmotoren unserer Autos, die alle einen Wirkungsgrad von maximal 40% haben. Der Rest der verfügbaren Energie wird in Wärme umgewandelt. Muss es immer so sein? Könnten wir nicht einen Motor bauen, der die im Treibstoff verfügbare Energie zu 100% in nützliche Arbeit umwandelt?

Um diese Fragen zu beantworten, brauchen wir die Thermodynamik. Wir müssen die Begriffe *Energie* und *Entropie* einführen und zwei thermodynamische Hauptsätze formulieren. Wie so häufig in der Wissenschaft werden wir sehen, dass die neue Theorie nicht nur die ursprüngliche Frage beantwortet, sondern einen wissenschaftlichen Durchbruch ermöglicht. So hat Erwin Schrödinger (Nobelpreis 1933) in den 1940er-Jahren über den Zusammenhang zwischen Leben und Entropie nachgedacht, und Ilya Prigogine (Nobelpreis 1977) hat die Theorie auf Systeme erweitert, die nicht im thermodynamischen Gleichgewicht sind [6,7].

Der erste Hauptsatz ist vielen Menschen als das Prinzip der Energieerhaltung bekannt. Der zweite Hauptsatz wird meistens wie folgt formuliert: *Die Entropie eines abgeschlossenen Systems kann nie abnehmen*. Diese Formulierung ist aus meiner Sicht weder verständlich noch besonders gut, weshalb ich die Ideen der Thermodynamik im Folgenden veranschaulichen werde.

2.1 Energie und Energieerhaltung

Fangen wir mit der Energie an. Sie lässt sich für die meisten physikalischen Systeme einwandfrei definieren und beschreibt die Fähigkeit des Systems, Arbeit zu verrichten. Es gibt verschiedene Formen, wie mechanische, elektrische, magnetische, chemische, oder thermische Energie, die ineinander umgewandelt werden können. Wir können gemäss Einstein sogar Masse in Energie umwandeln,

$$E = mc^2,$$

wo m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnen. Energie kann aber nicht aus dem Nichts entstehen und auch nicht einfach verschwinden.

Im Unterschied zur Entropie kann die Energie einzelnen Teilchen zugeordnet werden. Ein Molekül eines Gases hat eine wohldefinierte Energie und die totale Energie des Gases ist die Summe der Energien der einzelnen Moleküle. Aus der Gleichung von Einstein folgt, dass die Energie die Einheit $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ hat. Dafür wurde die Bezeichnung Joule (J) eingeführt, mit

$$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ W} \cdot \text{s} \approx 0.236 \text{ cal}.$$

Eine weitere Einheit für Energie, die vor allem für elektrische Energie genutzt wird, ist

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J} = 3.6 \text{ MJ}.$$

Übrigens, ein *Perpetuum Mobile der ersten Art* verletzt den ersten Hauptsatz. Solche Maschinen verrichten Arbeit, ohne dass es klar ist, woher die erforderliche Energie kommt.

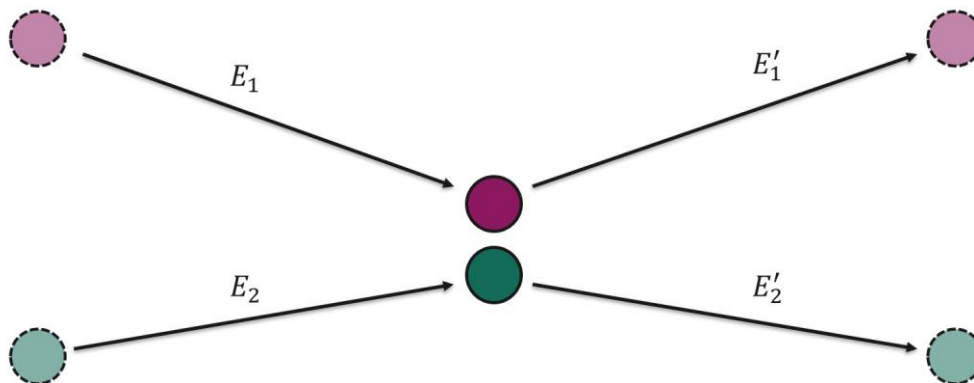


Abbildung 3 Energieaustausch bei der Kollision zweier Teilchen.

Die Idee der Energieerhaltung und des Energieaustausches wird in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Wir betrachten den Zusammenstoss zweier Teilchen, z.B. Moleküle in einem Gas, mit den Energien E_1 und E_2 . Nach dem Stoss haben sie die Energien E'_1 und E'_2 . Das Prinzip der Energieerhaltung sagt, dass die Summe der Energien vor und nach dem Stoss gleich sein müssen. Somit gilt

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2$$

Die Energieerhaltung gilt unabhängig davon, wie viele Teilchen das System enthält. Die Kollisionen oder Stösse zwischen den Molekülen in einem Gas verteilen nur die Energie um, ohne die Gesamtenergie zu verändern.

2.2 Thermodynamische Systeme und Systemgrenzen

Ein *thermodynamisches System* ist ein *endliches Gebiet*, das durch eine *Systemgrenze* von der Umgebung getrennt ist. Je nach Fragestellung können wir einen Kochtopf, eine Dampfmaschine, einen Baum, eine Stadt, oder die ganze Erde als thermodynamisches System betrachten. Wichtig dabei ist, dass das System sehr viele Teilchen enthält, da Thermodynamik nicht für einzelne Atome und Moleküle funktioniert.

Wie wir bereits gesehen haben, können wir dem System eine Energie zuordnen. Die ist die Gesamtenergie der Teilchen und ändert sich nur, wenn Energie über die Systemgrenze zu- oder abgeführt wird. Um dies mathematisch zu beschreiben, brauchen wir etwas Notation. Wir bezeichnen die totale Energie mit E , den Energiezufluss mit F_E^{in} und den Energieabfluss mit F_E^{out} , wie in Abbildung 4 dargestellt.

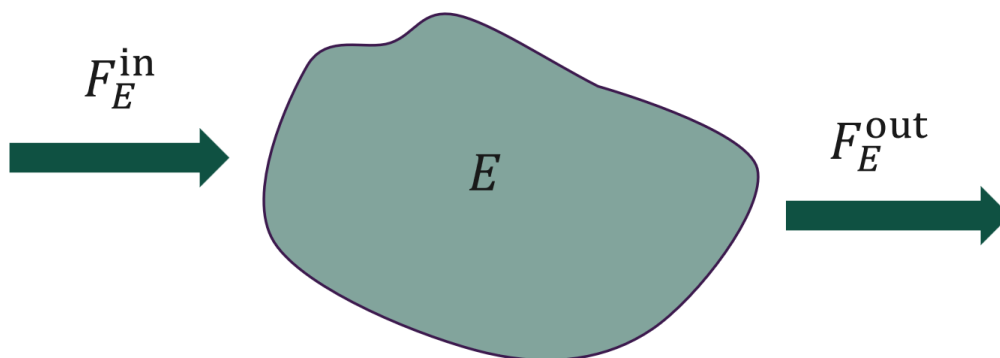


Abbildung 4 Energiefluss durch ein thermodynamisches System.

Wenn wir die zeitliche Änderung der Energie als dE/dt schreiben, können wir den ersten Hauptsatz wie folgt formulieren:

$$\frac{dE}{dt} = F_E^{\text{in}} - F_E^{\text{out}}.$$

Die Differenz zwischen der einströmenden und ausströmenden Energie entscheidet, wie schnell sich die totale Energie des Systems verändert. Wenn die Differenz null ist, bleibt die Energie konstant.

2.3 Irreversible Prozesse und thermodynamisches Gleichgewicht

Als nächstes betrachten wir zwei Behälter, die durch ein Ventil getrennt sind (vgl. Abbildung 5). Ein Behälter enthält Gas und der zweite ist zunächst leer (linkes Bild). Wenn wir das Ventil öffnen, wird sich das Gas erfahrungsgemäss gleichmässig auf beide Behälter verteilen. Der umgekehrte Prozess ist nicht möglich. Wenn wir mit dem rechten Bild starten, wo beide Behälter Gas enthalten, brauchen wir eine Vakuumpumpe, um das Gas wieder in den linken Behälter zurückzupumpen.

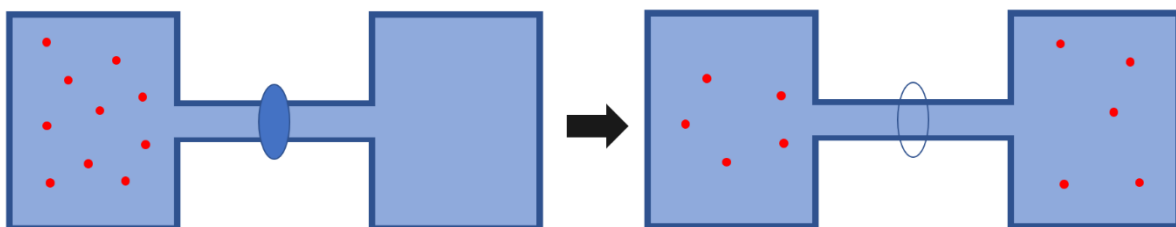


Abbildung 5 Irreversibles Prozess mit zwei Gasbehältern.

Warum eigentlich? Die Energie des Systems ist die Summe der Energien der Gasmoleküle und ist unabhängig davon, in welchem Behälter sich die Moleküle befinden. Beim Öffnen des Ventils bleibt die Energie des Systems unverändert und der erste Hauptsatz kann nicht

zwischen erlaubten und unerlaubten Prozessen unterscheiden. Anscheinend reicht die Energie nicht aus, um thermodynamische Zustände zu beschreiben und wir brauchen noch die Entropie.

Ein Prozess, der nur in eine Richtung verlaufen kann und somit unumkehrbar ist, wird *irreversibel* genannt. Wenn die Teilchen sich gleichmässig verteilt haben, ist das System im *thermodynamischen Gleichgewicht*. Dies ist auch der einfachste Zustand, da die Gasdichte überall gleich ist.

2.4 Wahrscheinlichkeit und verfügbare Zustände

Es stellt sich heraus, dass die Irreversibilität statistisch begründet werden muss. Wenn wir nur ein Molekül im System haben, wird dieses gleich häufig im linken und im rechten Behälter vorzufinden sein. Zu einem beliebigen Zeitpunkt ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Molekül im linken Behälter befindet

$$p_1 = \frac{1}{2}$$

Wir müssen nur warten, bis das Molekül sich links befindet und schnell das Ventil wieder zuzumachen. Mit einem Molekül wäre der Prozess reversibel.

Mit zwei Molekülen ist die Wahrscheinlichkeit, dass beide sich im linken Behälter befinden

$$p_2 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

Der Prozess ist immer noch reversibel aber wir müssen etwas länger warten.

Wenn wir N Teilchen haben, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie sich alle links aufhalten

$$p_N = \left(\frac{1}{2}\right)^N$$

Es ist leicht zu überprüfen, dass diese Wahrscheinlichkeit mit wachsendem N schnell gegen null geht. Der Grund, wieso sich die Gasmoleküle gleichmässig auf beide Behälter verteilen, ist rein statistisch und hat wenig mit der Wechselwirkung zwischen den Teilchen zu tun. Es ist einfach sehr unwahrscheinlich, alle Moleküle in einem Behälter zu finden.

2.5 Gleichverteilungssatz

Das gleiche Prinzip gilt für Energie. Wenn wir einen Thermobehälter mit kaltem Wasser füllen und einen heissen Stein hineinlegen, bevor wir den Deckel zumachen, haben wir ein abgeschlossenes thermodynamisches System, das sich nicht im Gleichgewicht befindet. Mit der Zeit wird sich der Stein abkühlen bis Stein und Wasser die gleiche Temperatur haben. Die Isolation der Thermobehälter sorgt aber dafür, dass die totale Energie des Systems gleichbleibt. Im thermodynamischen Gleichgewicht wird die Energie gleichmässig verteilt sein. Diese Aussage wird häufig als *Äquipartitionstheorem* oder *Gleichverteilungssatz* bezeichnet.

2.6 Definition der Entropie

Die Entropie wurde eingeführt, um die Irreversibilität mathematisch zu beschreiben. Sie wird in der Literatur meistens mit S bezeichnet und ist gegeben durch

$$S = k_B \ln W \quad k_B = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

wobei k_B die Boltzmannkonstante und W die Anzahl verfügbaren Zustände bezeichnen. Die physikalische Dimension der Entropie ist Energie geteilt durch Temperatur (in Kelvin) und bei Systemen im thermodynamischen Gleichgewicht gilt für kleine Änderungen dS , dass

$$dS = \frac{dE}{T} \Rightarrow dE = T dS$$

Als Beispiel nehmen wir das System mit zwei Behältern und betrachten die Änderung der Entropie. Wenn wir die Anzahl Zustände vor dem Öffnen des Ventils mit W_1 und die Anzahl Zustände nach dem Öffnen mit W_2 bezeichnen, ist die Entropieänderung

$$\Delta S = k_B \ln W_2 - k_B \ln W_1 = k_B \ln \left(\frac{W_2}{W_1} \right)$$

Wir wissen aber, dass sich die Anzahl Zustände pro Teilchen durch das Öffnen des Ventils verdoppelt hat, weil jedes Molekül sich in einem doppelt so grossen Volumen bewegen kann, weshalb

$$W_2 = 2^N W_1$$

Die Entropieänderung beim Öffnen des Ventils ist somit

$$\Delta S = k_B \ln \left(\frac{W_2}{W_1} \right) = N k_B \ln(2)$$

Da dies eine positive Zahl ist, hat die Entropie zugenommen, was für einen irreversiblen Prozess zu erwarten war.

Wir können jetzt die den zweiten Hauptsatz wie folgt formulieren:

Ein abgeschlossenes System wird versuchen, seine Entropie zu maximieren. Sobald der Zustand der höchsten Entropie erreicht wird, verändert sich das System nicht mehr und die Entropieproduktion ist null. Dies ist der einfachste Zustand oder das thermodynamische Gleichgewicht.

Leider wird Entropie häufig mit Unordnung übersetzt, was nicht stimmt. Ein Urwald hat nämlich viel tiefere Entropie als eine gut geordnete Parkanlage. Eine bessere Übersetzung lautet *Simplizität*. Der Gegensatz der Simplizität ist die Komplexität und der zweite Hauptsatz kann so formuliert werden, dass *die Komplexität eines Systems immer abnimmt*. Ein System mit zwei Gasdichten ist komplexer als wenn die Dichte überall gleich ist, weshalb die Gasdichte im Beispiel mit zwei Behältern ausgleichen wird. Analog ist ein System mit einer Temperatur einfacher als eines mit zwei Temperaturen und die Temperatur im Beispiel mit dem Stein im Thermobehälter wird sich dementsprechend ausgleichen. Je vielfältiger und komplexer ein System ist, desto tiefer ist die Entropie.

Der Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts (mit maximaler Entropie und minimaler Komplexität) ist dann erreicht, wenn sich Materie und Energie möglich gleichmässig verteilt haben. Intuitiv wissen wir, dass dies stimmt:

- Wir können eine Sandburg bauen, aber diese wird mit der Zeit zerfallen.
- Auch ein Wohnhaus wird durch die Einwirkung von Wind, Sonne und Regen zerfallen.
- Ein altes Auto verwandelt sich mit der Zeit in einen Rosthaufen.
- Ein Fels wird durch Erosion zu Sand.
- Eine Tasse Kaffee kühlt sich mit der Zeit ab.
- Gase vermischen sich.
- Der Staub verteilt sich gleichmässig in der Wohnung.
- Mikroplastik und Schadstoffe verteilen sich gleichmässig über die Erdoberfläche.

Aus den Beispielen wird klar, wieso Entropiezunahme auch als *thermodynamischer Zerfall* bezeichnet werden kann. Es sind irreversible Prozesse, die zur Erhöhung der Entropie oder Reduktion der Komplexität führen und deshalb spontan ablaufen. Wer erstaunt ist, dass giftige Chemikalien heute an den abgelegensten Orten der Welt gefunden werden können, hat den zweiten Hauptsatz nicht verstanden. Es war immer offensichtlich, dass sich die Schadstoffe gleichmässig über die Erde verteilen würden.

2.7 Thermodynamische Systeme: Energie and Entropie

Analog zum Energiefluss können wir auch einen Entropiefluss definieren. Für ein thermodynamisches System erhalten wir die Situation in der Abbildung 6. Das System ist durch Energie und Entropie charakterisiert. Beide Grössen können durch Austausch mit der Umgebung (über die Systemgrenze) verändert werden. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied: Während die Energie des Systems nur durch diesen Austausch verändert werden kann, kann Entropie im inneren des Systems erzeugt werden. Wir bezeichnen diese Entropieproduktion mit P_S .

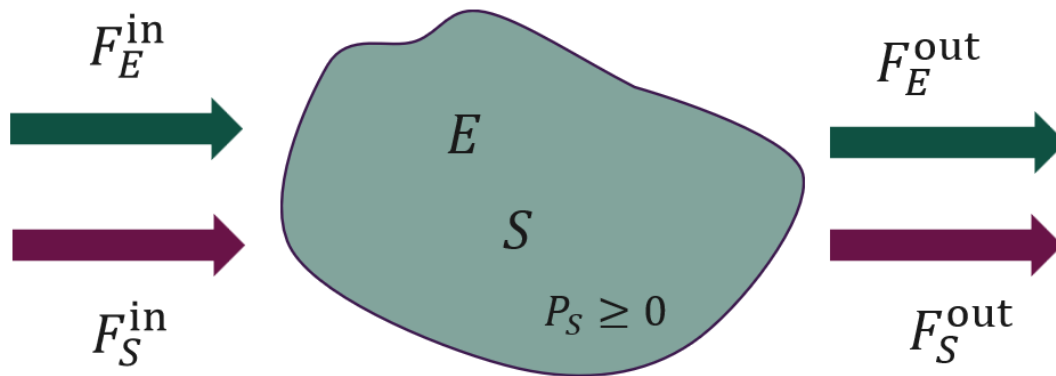


Abbildung 6 Energie- und Entropieflüsse eines thermodynamischen Systems.

Die beiden Hauptsätze lassen sich jetzt wie folgt formulieren:

$$\frac{dE}{dt} = F_E^{\text{in}} - F_E^{\text{out}}$$

$$\frac{dS}{dt} = F_S^{\text{in}} - F_S^{\text{out}} + P_S, \quad P_S > 0.$$

Die erste Gleichung oder der erste Hauptsatz zeigt, wie die Energie eines Systems von aussen verändert werden kann. Die zweite Gleichung, oder der zweite Hauptsatz, besagt, dass die Entropie eines Systems durch Zu- und Abflüsse aber auch durch interne Entropieproduktion verändert werden kann. Entropie kann allerdings nur erzeugt aber nie vernichtet werden.

Ein *abgeschlossenes System* tauscht weder Energie noch Entropie mit der Umgebung aus. Aus den obigen Gleichungen folgt sofort, dass die Energie konstant bleibt aber die Entropie zunehmen kann. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Entropie maximal und die Entropieproduktion verschwindet.

Wenn wir die Entropie *eines offenen Systems* senken wollen, muss es mehr Entropie an die Umgebung abgeben als die Summe der einströmenden Entropie und der internen Entropieproduktion,

$$\frac{dS}{dt} < 0 \Rightarrow F_S^{\text{out}} > F_S^{\text{in}} + P_S$$

Wir können ein komplexes System mit tiefer Entropie aufbauen, wenn wir bereit sind, mindestens gleich viel Komplexität irgendwo sonst zu vernichten.

Die Klassifizierung thermodynamischer Systeme ist etwas gewöhnungsbedürftig. Ein *offenes System* tauscht Energie und Materie mit der Umgebung aus, wie zum Beispiel die Flamme einer Kerze. Bei einem *geschlossenen System* ist die Systemgrenze für Energie (und natürlich Entropie) offen, aber nicht für Materie. Ein Beispiel dafür ist eine Wärmepumpe. Bei einem *abgeschlossenen* oder *isolierten System* wird gar nichts mit der Umgebung ausgetauscht. Die Aussage, dass die Entropie immer zunehmen muss, ist somit nur für abgeschlossene Systeme gültig.

Ein *Perpetuum Mobile der zweiten Art* ist eine Maschine, die den zweiten Hauptsatz verletzt. Das kann nur funktionieren, wenn Entropie irgendwo vernichtet wird.

Die Erde ist in guter Näherung ein geschlossenes, aber nicht abgeschlossenes System, da sie zwar Energie und Entropie in der Form von elektromagnetischer Strahlung mit dem Universum austauscht, aber kaum Materie.

2.8 Komplexe Systeme und Leben

Wie Erwin Schrödinger vor 80 Jahren festgestellt hat, gibt es einen Widerspruch zwischen Thermodynamik und Leben [6]. Ein Menschenkörper ist ein komplexes System, das sich weit vom thermodynamischen Gleichgewicht befindet und es trotzdem schafft, den thermodynamischen Zerfall um Jahrzehnte aufzuhalten. Nach dem Tod schlägt der zweite Hauptsatz voll zu und der Körper zerfällt sehr schnell.

Das Prinzip ist für alle Tiere gleich und wir nehmen als Beispiel eine Kuh auf der Weide. Da sie die interne Entropieproduktion nicht abstellen kann und trotzdem darauf angewiesen ist, den thermodynamischen Zerfall aufzuhalten, muss sie hochqualitative Nahrung mit wenig Entropie aufnehmen und genügend Entropie ausscheiden. Dies ist auch der Fall: Das Grass, das von der Kuh gefressen wird, hat mehr Struktur und Komplexität als das, was hinten rauskommt.

Der Preis dafür ist, dass die Kuh ihre Umwelt zerstört. Sobald sie ein Gebiet abgegrast hat, muss sie weiterziehen, um frisches Gras zu finden. Die maximale Anzahl Kühe auf einem Stück Weideland ist durch die Photosynthese der Pflanzen begrenzt.

2.9 Elektromagnetische Strahlung

Der zweite Hauptsatz kennt keine Ausnahmen. Wenn wir Komplexität irgendwo aufbauen wollen, müssen wir Komplexität irgendwo anders vernichten. Wir wissen aber, dass Bäume während hunderten von Jahren an einem Ort wachsen können, ohne ihre Umwelt zu zerstören. Wie ist dies möglich? Um dies zu verstehen, müssen wir uns zuerst mit dem Energie- und Entropietransport durch elektromagnetische Strahlung auseinandersetzen. Betrachten wir dafür einen Stein, der in der Sonne liegt (vgl. Abbildung 7). Dieser empfängt auf der einen Seite elektromagnetische Energie in der Form von sichtbarem Licht von der Sonne. Das Sonnenlicht transportiert aber nicht nur Energie, sondern auch Entropie.

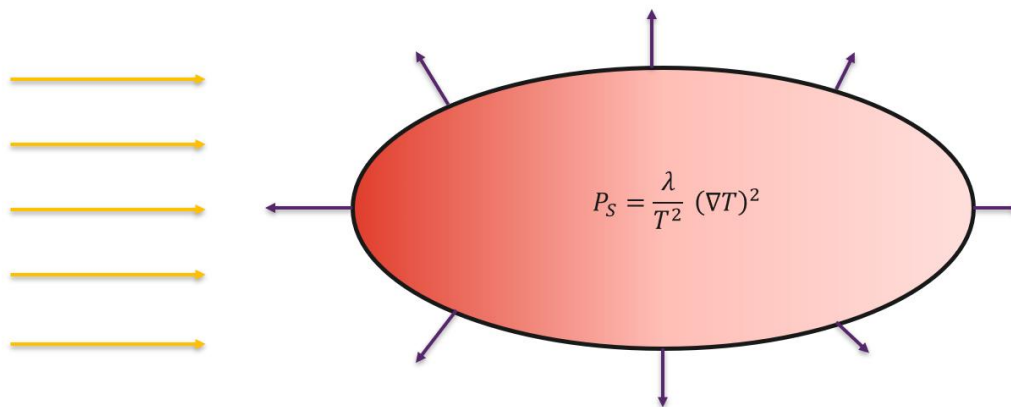


Abbildung 7 Energie- und Entropieflüsse für einen Stein in der Sonne.

Zur Vereinfachung nehmen wir an, dass wir die Entropie als Energie geteilt durch Temperatur berechnen können. Somit gilt für die Sonneneinstrahlung

$$F_S^{\text{in}} = \frac{F_E^{\text{in}}}{T_{\text{Sonne}}}$$

mit der Sonnentemperatur $T_{\text{Sonne}} \approx 5500 \text{ °C}$. Dies stimmt nicht ganz, aber für die Überlegung ist nur wichtig, dass der Entropiestrom proportional zum Energiestrom ist.

Der Stein wird sich aufwärmen, bis absorbierte und abgegebene Leistung gleich sind,

$$F_E^{\text{in}} = F_E^{\text{out}}$$

Um die Diskussion weiter zu vereinfachen, nehmen wir an, dass der Stein nur Energie in Form von Wärmestrahlung (oder infraroter Strahlung) verliert, was in Vakuum korrekt wäre. Für die Entropieabgabe haben wir dann

$$F_S^{\text{in}} = \frac{F_E^{\text{in}}}{T_{\text{Stein}}}$$

wo T_{Stein} die mittlere Oberflächentemperatur des Steins bezeichnet.

Es ist wichtig zu verstehen, dass der Stein sich nicht im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Da er nur auf der Sonnenseite aufgewärmt wird, ist die Temperatur nicht überall gleich. Daraus resultiert ein interner Wärmefluss im Stein, der für die interne Entropieproduktion zuständig ist. Die Temperaturverteilung ist aber zeitlich konstant (oder stationär), weshalb sowohl die totale Energie wie auch die Entropie des Steins zeitlich konstant bleiben. Aus den beiden Hauptsätzen folgt dann:

$$P_S = F_S^{\text{out}} - F_S^{\text{in}} \approx F_E^{\text{in}} \left(\frac{1}{T_{\text{Stein}}} - \frac{1}{T_{\text{Sonne}}} \right) > 0$$

Ein Stein in der Sonne ist somit eine Entropiemaschine, die hochwertige Sonnenstrahlen in weniger wertvolle Wärmestrahlung umwandelt. Anders formuliert wandelt der Stein eine kleine Anzahl hochenergetische Photonen in viele niederenergetische Photonen um. Dies erhöht die Entropie der Umgebung.

2.10 Photosynthese

Als nächstes betrachten wir eine Pflanze, wie in Abbildung 8 dargestellt. Verglichen mit dem Stein stellen wir zwei Unterschiede fest. Erstens wächst die Pflanze, wodurch elektromagnetische Energie der Strahlung in chemisch gebundene Energie umgewandelt wird.



Abbildung 8 Energie- und Entropieflüsse für eine Tomatenpflanze.

Die Energie des Systems nimmt zu und wir haben

$$\frac{dE}{dt} = F_E^{\text{in}} - F_E^{\text{out}} > 0$$

Andererseits werden grössere Moleküle aus Wasser und Kohlendioxid synthetisiert, was mit einer Erhöhung der Komplexität verbunden ist. Die Entropie des Systems nimmt somit ab,

$$\frac{dS}{dt} = F_S^{\text{in}} - F_S^{\text{out}} + P_S < 0$$

Dies ist nur möglich, wenn die interne Entropieproduktion und die Temperatur des Systems klein gehalten werden können, damit genug Entropie als elektromagnetische Strahlung abgegeben werden kann.

Wenn wir an einem heißen Sommertag in einen Wald gehen, befinden wir uns in einer chemischen Fabrik, die allen menschengemachten Technologien überlegen ist. Ohne sich zu

erwärmen, nehmen die Bäume grosse Mengen Sonnenenergie auf und wandeln diese in Biomasse um. Es entsteht Komplexität, ohne dass sonst irgendwo auf der Erde etwas zerstört wird. Der Grund dafür ist, dass die resultierende Entropie als elektromagnetische Strahlung ins Weltall zurückgegeben wird. Der zweite Hauptsatz wird somit nicht verletzt, aber die Zerstörung der Komplexität findet ausserhalb unseres Planeten statt.

Die Bedeutung der Thermodynamik wurde von der alten Bauerngesellschaft sehr gut verstanden. Die verfügbare erneuerbare Ressource war die Photosynthese auf dem verfügbaren Land. Ein Teil davon wurde für Ackerbau genutzt, aber diese Fläche war im Wesentlichen durch die Anzahl Menschen und Tiere begrenzt. Erstens weil Menschen, Pferde und Ochsen die Arbeit verrichteten und zweitens damit genug Dünger zur Verfügung stand. Die restliche Fläche wurde als Wald und Weideland genutzt. Wiederkäuer haben den Vorteil, dass sie sich von Gras und Blättern ernähren können, was den Menschen nicht möglich ist. Somit hat man die Kühe, Schafe und Ziegen auf dem Land weiden lassen, das für Ackerbau nicht geeignet war. Die Energie der Sonne wurde so in Milch, Fleisch, Leder, Wolle und Naturdünger umgewandelt und ging nicht verloren.

Ein Bauerndorf im Mittelalter war grösstenteils selbstversorgend. Wenn wir das Dorf als thermodynamisches System betrachten, bedeutet dies, dass nur wenig Material über dies Systemgrenze transportiert wurde. Die Maschinen (d.h. die Pferde) haben sich selbst vermehrt und vom Land ernährt. Das Holz zum Heizen, Kochen und Bauen wurde lokal produziert, wie auch das Essen der Menschen. Ausserdem haben die Menschen verstanden, dass Ackerflächen nicht beliebig lange genutzt werden konnten. Wenn die Böden zu schlecht wurden, hat man wieder Bäume gepflanzt und dafür ein Stück Wald in Ackerland umgewandelt. «Der Wald ist die Mutter der Erde». Die Thermodynamik erklärt wieso.

Die Entdeckung der fossilen Brennstoffe hat alles verändert. Die Pferde wurden durch Traktoren ersetzt und die natürlichen Düngemittel durch Kunstdünger. Grössere Ackerflächen konnten mit weniger Arbeit genutzt werden und Erträge sind gestiegen. Dafür wurde die Systemgrenze aufgemacht. Ein moderner Bauernbetrieb ist nicht selbstversorgend, da Treibstoff, Maschinen und Kunstdünger importiert werden müssen. Er wandelt somit nicht nur Sonnenlicht in Lebensmittel um, sondern auch fossile Brennstoffe. Die Erträge pro Fläche sind gestiegen, aber die Nachhaltigkeit wurde geopfert.

3 Der vitale Planet

Die vielleicht bekannteste Definition der Nachhaltigkeit ist die der Brundtland-Kommission:

Nachhaltige Entwicklung befriedigt die Bedürfnisse der Gegenwart, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können. [8]

Mit Hilfe der Thermodynamik können wir verstehen, was mit dieser Definition falsch ist und wie wir sie verbessern können.

Wer einen grossen intakten Urwald besitzt, hat viele Optionen. Der Wald kann wichtige Rohstoffe liefern aber auch in fruchtbares Ackerland umgewandelt werden. Das Holz des Waldes kann in kürzester Zeit verbrannt werden, um Energie für industrielle Prozesse zur Verfügung zu stellen, aber die Regeneration des Waldes dauert Jahrhunderte.

Auch wer eine Ölquelle findet, kann sich glücklich schätzen. Das Öl liefert nicht nur Energie, sondern auch den Rohstoff für die ganze petrochemische Industrie.

Eine Kupfermine mit einem hohen Kupfergehalt ist auch eine gute Ausgangslage, um reich zu werden. Je kleiner die Kupferkonzentration, desto weniger attraktiv wird die Nutzung.

Der Wald, die Ölquelle und die Kupfermine sind alle Systeme mit hoher Komplexität und entsprechend tiefer Entropie. Gemäss dem zweiten Hauptsatz sollte das Kupfer nicht konzentriert vorkommen und die komplexen Kohlwasserstoffmoleküle im Öl und im Holz sollten sich in Wasser und Kohlendioxid zersetzen.

Es scheint somit ein allgemeines Prinzip zu sein, dass menschliche Gesellschaften besser funktionieren, wenn sie Zugang zu einem Reservoir mit niedriger Entropie haben. Wenn wir künftigen Generationen ähnlich gute Voraussetzungen geben wollen, müssen wir sicherstellen, dass solche Reservoirs auch künftig zur Verfügung stehen werden. Die Entropie unserer Gesellschaft darf somit nicht zunehmen.

Wir müssen aber auch die Systemgrenzen beachten. Eine Gesellschaft kann ihre Entropie klein halten, indem sie Entropie mit der Umgebung austauscht. Die reichen Industrieländer machen dies gerade vor, da sie wertvolle Produkte aus ärmeren Ländern importieren und den resultierenden Müll auch dort entsorgen. Dies ist kein neues Phänomen; das alte Rom war nicht selbstversorgend, sondern von Importen und Exporten abhängig. Wenn wir die ganze Erde nachhaltig betreiben wollen, müssen wir die Systemgrenze ausserhalb der Atmosphäre legen. Diese Systemgrenze ist nur für elektromagnetische Strahlung durchlässig.

Für Entwicklung ist Energie erforderlich. Wir müssen in der Lage sein, Energie von der Sonne zu nutzen, ohne den Planeten zu erwärmen. Somit haben wir eine thermodynamische Definition der nachhaltigen Entwicklung:

Nachhaltige Entwicklung bedeutet, sich wie ein auf Photosynthese basierendes Ökosystem zu verhalten, d.h. Energie von der Sonne aufzunehmen, ohne dabei zu viel Entropie zu erzeugen.

Ist dies möglich? Schauen wir uns die beiden Hauptsätze nochmals für das thermodynamische System der Erde an. Erstens müssen wir Energie von der Sonne aufnehmen, d.h.

$$F_E^{\text{in}} > F_E^{\text{out}}$$

Wir können dies auch wie folgt schreiben,

$$F_E^{\text{out}} = F_E^{\text{in}} - \Delta F_E$$

mit der Nettoenergieaufnahme ΔF_E . Aus dem zweiten Hauptsatz haben wir für die Entropie,

$$F_S^{\text{in}} - F_S^{\text{out}} + P_S < 0$$

Wenn wir die Entropieströme durch Energieströme ersetzen, finden wir

$$\frac{F_E^{\text{in}}}{T_{\text{Sonne}}} - \frac{F_E^{\text{out}}}{T_{\text{Erde}}} + P_S < 0$$

oder

Nachhaltigkeitsformel:

$$\Delta F_E < \left(1 - \frac{T_{\text{Erde}}}{T_{\text{Sonne}}}\right) F_E^{\text{in}} - P_S T_{\text{Erde}}$$

Die maximale Menge an Energie, die ein vitaler Planet von der Sonne aufnehmen kann, ist durch die Entropiebilanz limitiert.

Hiermit haben wir eine einfache Formel für die Nachhaltigkeit der Erde gefunden. Ein nachhaltiges System ist dadurch charakterisiert, dass es Sonnenenergie nutzt, um immer komplexer zu werden. Dafür müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- Die Energiebilanz muss positiv sein: Das System muss mehr Energie von der Sonne absorbieren als es Wärme abstrahlt.
- Die Entropiebilanz muss negativ sein: Das System muss mehr Entropie abgeben als die Summe der produzierten und der aufgenommenen Entropie.

Wir sehen, dass die Temperaturdifferenz zwischen der Sonne und der Erde essenziell ist. Da die Entropieproduktion P_S immer positiv ist, muss der erste Term auf der rechten Seite hinreichend gross sein. Dies ist nur möglich, wenn genug Sonnenenergie (F_E^{in}) zur Verfügung steht und die Sonne viel wärmer ist als die Erde, $T_{\text{Sonne}} \gg T_{\text{Erde}}$. Ausserdem muss die Entropieproduktion klein gehalten werden.

Die Evolution hat dieses Prinzip sehr gut verstanden. Abbildung 9 zeigt ein Blumenbeet in Rapperswil an einem heissen Sommertag. Das linke Bild wurde mit einer normalen Kamera gemacht und das rechte mit einer Wärmebildkamera. Obwohl die Pflanzen und die Betonmauer der gleichen Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, sind die Pflanzen deutlich kälter. Dadurch schaffen sie es, die interne Entropieproduktion möglichst klein zu halten und genügend Entropie abzugeben. Sonst wären die Pflanzen nicht nachhaltig.

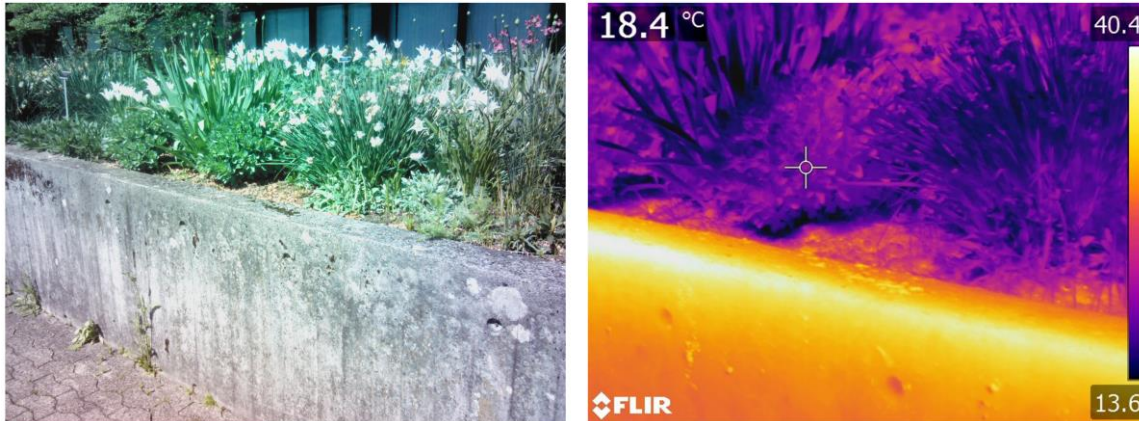


Abbildung 9 Blumenbeet an ein einem heissen Sommertag.

Die im Boden eingelagerten fossilen Brennstoffe sind der Beweis dafür, dass sich die Erde sehr lange an die Spielregeln der Entropie gehalten hat. Grosse Mengen Sonnenenergie wurden aufgenommen und in chemische Energie umgewandelt. Somit war die Energiebilanz positiv. Gleichzeitig wurden komplexe Moleküle synthetisiert und die Zusammensetzung der Atmosphäre verändert, was zu einer Reduktion der Entropie führte. Die Erde wurde komplexer und vielfältiger.

Ein *vitaler Planet* erfüllt die Nachhaltigkeitsformel und die Erde war bis zur Industrialisierung ein Beispiel dafür. Inzwischen leben wir aber auf einem sterbenden Planeten. Wir nehmen zwar immer noch Energie von der Sonne auf, aber diese wird nicht in nutzbare chemische Energie, sondern in Wärme umwandelt, wodurch die Temperatur des Planeten steigt.

Soweit wir wissen, hat es im Universum nur einen vitalen Planeten gegeben. Dank der menschlichen Zivilisation gibt es heute keinen mehr.

4 Wie weiter?

Liebe Nachwelt! Wenn Ihr nicht gerechter, friedlicher und überhaupt vernünftiger sein werdet, als wir sind, bzw. gewesen sind, so soll euch der Teufel holen.

Albert Einstein (1879 – 1975)

Schauen wir uns die Entwicklung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre an, die in Abbildung 10 dargestellt wird. Die durgezogene blaue Kurve zeigt die gemessene Konzentration mit den durch die Jahreszeiten verursachten charakteristischen Schwankungen. Ende 2023 war die Konzentration über 420 ppm, d.h. 50% höher als vor der Industrialisierung. Jedes dritte CO₂-Molekül in der Atmosphäre ist somit menschlichen Ursprungs.

Der rote Bereich zeigt CO₂-Konzentrationen, die nicht mehr mit den Pariser Klimazielen kompatibel sind. Die Grenzen für +1.5°C und +2.0°C können abgeschätzt werden, sind aber nicht sonderlich relevant [9]. Das Problem mit der CO₂-Konzentration ist, dass sie immer schneller ansteigt: Im Jahr 1958 betrug die Zunahme 0.8 ppm pro Jahr. Heute ist der Anstieg etwa dreimal schneller. Wenn wir diesen beschleunigenden Trend nicht bald brechen können, werden wir alle sterben.

Der Klimawandel ist einfach erklärbar: «Man soll nie einen Verbrennungsmotor in einem geschlossenen Raum betreiben». Jeder Mensch versteht diesen Satz. Es ist auch allen klar,

dass wir gegen eine Wand fahren und immer noch beschleunigen. Wer den Vorschlag bringt, den Fuss vom Gaspedal wegzunehmen, wird ausgelacht. Wer die Bremse betätigen möchte, wird verhaftet. Die Lösung der Klimakrise ist ein politisches und kein wissenschaftliches Problem.

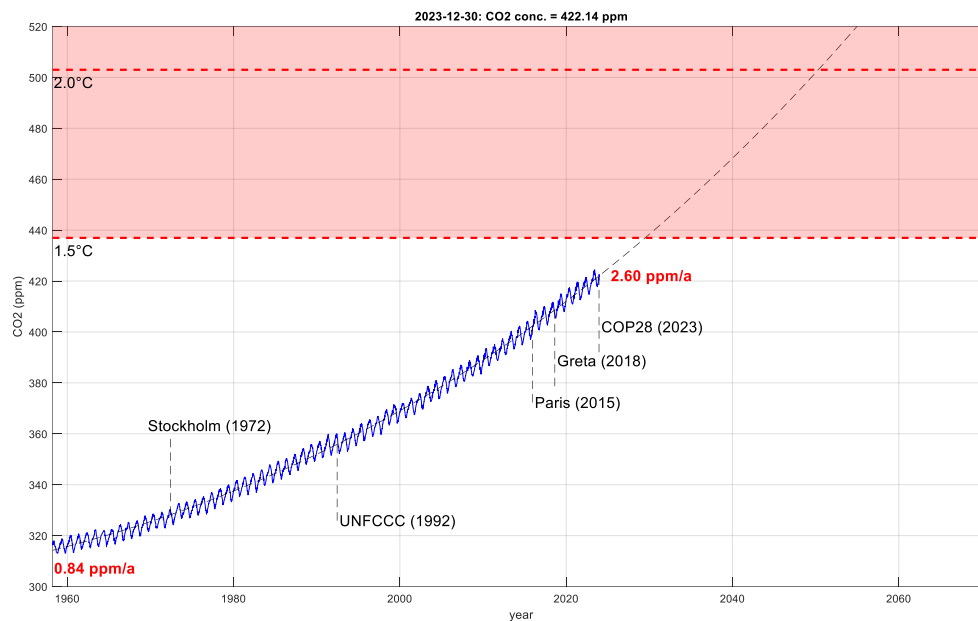


Abbildung 10 Die Keeling-Kurve

Es ist auch eine Tatsache, dass die Menschen der reichen Nationen viel zu viel Ressourcen verbrauchen und durch ihr Konsumverhalten und ihren Energieverbrauch den grössten Beitrag zum Anstieg der CO₂-Konzentration liefern. Trotzdem werden regelmässig Nachhaltigkeitsrankings veröffentlicht, bei denen die skandinavischen Länder am besten abschneiden [10]. Es werden irgendwelche absurde Kriterien für Nachhaltigkeit definiert, die zu einem lächerlichen Ergebnis führen, aber die Menschen haben resigniert und können nicht mehr darüber lachen.

Galileo Galilei hat im Jahr 1615 einen langen und bemerkenswerten Brief an die Grossherzogin Christina mit der folgenden Bitte geschrieben:

Ich möchte jene sehr klugen Väter bitten, dass sie mit aller Sorgfalt den Unterschied bedenken möchten, der zwischen den auf Meinung gegründeten und den beweisbaren Lehren besteht: Wenn sie sich nämlich deutlich vor Augen stellen würden, mit welcher Kraft die zwangsläufigen Schlussfolgerungen zwingend sind, würde ihnen eher klar werden, dass es nicht in der Macht der Professoren der beweisenden Wissenschaften steht, die Meinungen nach ihrem Willen zu ändern, indem sie sich bald dieser und bald jener anschliessen, und dass ein grosser Unterschied besteht zwischen dem Befehl an einen Mathematiker oder an einen Philosophen und der Anordnung an einen Kaufmann oder an einen Rechtsgelehrten, und dass die bewiesenen Schlüsse über die Dinge der Natur und des Himmels nicht mit der gleichen Leichtigkeit geändert werden können wie die Meinungen über das, was in einem Vertrag, einem Census oder einem Wechsel zulässig ist.

Galileo Galilei, 1615, siehe auch [Denken ist erlaubt – Henrik Nordborg](#)

Kürzlich habe eine Präsentation mit diesem Zitat angefangen, worauf ich von einigen Mitgliedern des Publikums heftig kritisiert wurde: Es sei ein Affront zu behaupten, dass die Naturwissenschaften einen höheren Stellenwert haben als Wirtschafts- oder Rechtswissenschaften. Das hat Galileo auch nicht behauptet. Er hat nur festgehalten, dass die Naturgesetze nicht durch die Gesellschaft verändert werden können und deshalb nicht Gegenstand der politischen Debatte sein sollten. Mit Ernüchterung habe ich feststellen müssen, dass die Aussage

Galileos aus dem Jahr 1615 von der Mehrheit der Bevölkerung immer noch nicht verstanden wird. «Gesetz ist Gesetz» wird häufig behauptet. Das stimmt so nicht. Naturgesetze sind Naturgesetze aber die Gesetze der Gesellschaft können umgeschrieben werden.

Der Verurteilung Galileos im Jahr 1633 ist höchst relevant, da unsere Gesellschaft auf den Bericht «Grenzen des Wachstums» im Jahr 1972 ähnlich reagiert hat [11,12]. Was nicht sein darf, kann auch nicht sein. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen mögen schlaue sein, aber sie sind genauso unethisch, opportunistisch und naiv wie alle anderen. Wie Galileo vor 350 Jahren sind die wenigsten von ihnen bereit, für die Wahrheit auf dem Scheiterhaufen zu sterben oder weniger Forschungsförderung zu erhalten.

Somit sind wir heute in der etwas absurden Situation, dass unsere Definition der Nachhaltigkeit eher auf politischen Überlegungen als auf wissenschaftlichen Fakten basiert. Auch wenn wir uns alle sehr nachhaltig verhalten, werden wir untergehen.

Nach der Explosion der Raumfähre Challenger im Jahr 1986 hat Richard Feynman folgendes festgehalten:

Für eine erfolgreiche Technologie muss die Realität höher gewertet werden als die Öffentlichkeitsarbeit, denn die Natur lässt sich nicht täuschen. [13]

Richard Feynman

Elon Musk kann davon ein Lied singen. Egal wie viel Werbung er für *Space X* macht; wenn die Raketen falsch konstruiert sind, werden sie den Start nicht überleben. Naturgesetze sind eben nicht verhandelbar.

Es ist inzwischen allen klar, dass wir aufhören müssen, fossile Brennstoffe zu verbrennen. Aber was können wir denn sonst verbrennen? Die auf der Erde erzeugte Biomasse reicht bei weitem nicht aus, um die fossilen Brennstoffe zu ersetzen. Zum ersten Mal seit mehr als einer Million Jahren muss die Menschheit wieder lernen, ohne Feuer auszukommen. Zurück in die Steinzeit reicht bei weitem nicht; als das Feuer erfunden wurde, gab es die *Homo Sapiens* noch nicht.

Selbstverständlich schlage ich nicht eine Rückkehr in die Höhlen der Vergangenheit vor. Wir leben aber heute in einer Welt, in der alle über Nachhaltigkeit sprechen, aber niemand weiss, was damit gemeint ist. Ist nachhaltiges Wachstum möglich? Ist ein Elektroauto nachhaltiger als eines mit Verbrennungsmotor? Wie wollen wir die ökologische Auswirkung von Solaranlagen, Windturbine, und Wasserkraftwerken bewerten? Ist Artenschutz wichtiger als der Ausbau der erneuerbaren Energien. Dies sind alles Fragen, die wir nicht beantworten können, weil wir uns geweigert haben, Nachhaltigkeit zu definieren.

Die oben vorgeschlagene Nachhaltigkeitsformel hat den Vorteil, dass sie sowohl für anthropogene wie auch natürliche Prozesse gilt, und dass alle darin vorkommende Größen messbar sind. Die Energie und Entropiebilanz der Erde kann durch Satelliten erfasst werden, und die Entropieproduktion von physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen ist bekannt oder messbar. Wir hätten somit eine eindeutige Antwort auf die oben gestellten Fragen und könnten die Unmöglichkeit des nachhaltigen Wachstums als Konsequenz der Thermodynamik herleiten. Damit wäre einiges erreicht.

Vernünftige Nachhaltigkeitsziele müssen zwei Bedingungen erfüllen:

1. Sie müssen objektiv messbar sein.
2. Sie müssen hinreichend ambitioniert sein, damit es genügt, wenn sie für alle gelten.

Die oben beschriebene Nachhaltigkeitsformel erfüllt beide Bedingungen.

Wissenschaftliche Revolutionen haben gesellschaftliche Konsequenzen. Die Newtonsche Mechanik, die Relativitätstheorie, die Quantenmechanik, die Mikrobiologie und die Genetik haben alle unser Weltbild verändert. Die thermodynamische Nachhaltigkeit könnte einen ähnlichen Effekt haben, weil sie unsere Sicht auf die Welt verändern würde. Folgende Aussagen wären dann wissenschaftliche Tatsachen und stünden nicht zur Diskussion:

1. Die Menschheit hat es geschafft, einen vitalen Planeten in einen sterbenden zu verwandeln. Die Erde befindet sich im thermodynamischen Zerfall.
2. Die Treibhausgase, wie Kohlendioxid und Methan, sind nicht nur die Verursacher des Klimawandels, sondern die Verwesungsgase eines sterbenden Planeten.
3. Wahre Nachhaltigkeit ist möglich. Es gibt Prozesse, die den Planeten heilen und die Vielfalt erhöhen. Die Pflanzen machen es vor.
4. «Radikale Umweltschützer» sind Menschen, deren Weltbild mit den Gesetzen der Thermodynamik kompatibel ist. Man muss nicht Thermodynamik verstehen, um eine intakte Umwelt erhalten zu wollen. Wer es aber nicht will, hat die Thermodynamik nicht verstanden. Es sind die «Umweltzerstörer», die radikal und ungebildet sind.
5. Bestehende menschengemachte Technologien sind nicht nachhaltig. Dies heisst aber nicht, dass es solche nicht geben könnte. Wir haben es bisher nicht versucht, nachhaltige Technologien zu entwickeln, weil wir uns nie um die Entropiebilanz gekümmert haben.
6. Die Verbrennung von organischem Material ist das Dummste, was wir tun können, da es sowohl Entropie wie auch CO₂ produziert, wodurch die Erde ihre Fähigkeit verliert, Entropie zu emittieren.
7. Geoengineering ist Selbstmord. Selbstverständlich können wir die Erde abkühlen, indem wir die Sonneneinstrahlung abblocken. Wir zerstören dann aber auch die einzige verfügbare Quelle nachhaltiger Energie. Die Wälder und die Solarbranche würden sich nicht freuen.
8. Die Aussage, dass die Erde jährlich viel mehr Energie von der Sonne empfängt als der Energieverbrauch der Menschheit, ist richtig aber irrelevant. Wir empfangen jetzt schon zu viel Energie der Sonne, weshalb die Erde sich erwärmt.
9. Solarpanels wandeln Sonnenlicht in Strom und Wärme um. Die Wärme trägt direkt zur Entropieproduktion bei, was sogar das Klima lokal verändern kann [14]. Wenn der Strom genutzt wird, um einen Computer oder ein Elektroauto zu betreiben, entsteht am Schluss noch mehr Wärme. Die Nachhaltigkeit der Photovoltaik ist davon abhängig, was mit dem Strom passiert.
10. Die Erde hat kein Energieproblem, sondern ein Problem mit der Entsorgung der Entropie. Dieses «Entsorgungsproblem» limitiert die nutzbare Energie.

Jede Gesellschaft produziert Abfall. Da die Systemgrenze der Erde nur für elektromagnetische Strahlung durchlässig ist, darf eine nachhaltige Gesellschaft nur Abfall in der Form von elektromagnetischer Strahlung produzieren. Die Bäume haben dies längs verstanden. Die Menschen noch nicht.

5 Literatur

- [1] J.M. Diamond, Kollaps: Warum Gesellschaften überleben oder untergehen, Fischer-Taschenbuch, Frankfurt am Main, 2020.
- [2] J.A. Tainter, The collapse of complex societies, Cambridge University Press, Cambridge, 2011.
- [3] MeteoSchweiz, Klimawandel, <https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klimawandel.html>.
- [4] M. Scheffer, I. van de Leemput, E. Weinaans, J. Bollen, The rise and fall of rationality in language, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 118 (2021). <https://doi.org/10.1073/pnas.2107848118>.
- [5] G. Orwell, The Prevention of Literature, 1946, <https://www.orwellfoundation.com/the-orwell-foundation/orwell/essays-and-other-works/the-prevention-of-literature/>.

- [6] E. Schrödinger, Was ist Leben?: Die lebende Zelle mit den Augen des Physikers betrachtet, Piper, München, 2004.
- [7] D. Kondepudi, I. Prigogine, Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures / Dilip Kondepudi, Wake Forest University, USA, Ilya Prigogine, formerly director, International Solvay Institutes, Belgium, Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2015.
- [8] World Commission on Environment and Development, Our common future, Oxford University Press, Oxford, New York, 1987.
- [9] R.D. Lamboll, Z.R.J. Nicholls, C.J. Smith, J.S. Kikstra, E. Byers, J. Rogelj, Assessing the size and uncertainty of remaining carbon budgets, Nat. Clim. Chang. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01848-5>.
- [10] Sustainable Development Report, 2023, <https://dashboards.sdindex.org/rankings>.
- [11] K. Shields, Tipping Point: The True Story of "The Limits to Growth", 2023, <https://tippingpoint-podcast.com>.
- [12] D.H. Meadows, J. Randers, D.L. Meadows, Grenzen des Wachstums: Das 30-Jahre-Update Signal zum Kurswechsel, 8th ed., S.Hirzel, Stuttgart, 2023.
- [13] R.P. Feynman, Report of the PRESIDENTIAL COMMISSION on the Space Shuttle Challenger Accident: Appendix F - Personal Observations on Reliability of Shuttle, 1986.
- [14] Z. Lu, Q. Zhang, P.A. Miller, Q. Zhang, E. Bertell, B. Smith, Impacts of Large-Scale Sahara Solar Farms on Global Climate and Vegetation Cover, Geophys Res Lett 48 (2021). <https://doi.org/10.1029/2020GL090789>.