



Eine erste naturwissenschaftliche Theorie der Nachhaltigkeit: Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit

Bernhard Weßling (MLS)

Veröffentlicht: 22. Juni 2026

Abstract

Three factors motivated the development of the concept presented in the lecture¹ on which this article is based: “Sustainability” has become a term that is overused and, for the most part, misappropriated for political and commercial marketing purposes.

- Thermodynamics, and especially entropy, are understood only very limitedly and mostly incorrectly; non-equilibrium thermodynamics is virtually unknown, even among natural scientists.
- In climate research and the discussion surrounding climate stabilization measures, thermodynamics plays virtually no role.

It will be demonstrated how entropy can be understood and communicated in a very practical way within the framework of non-equilibrium thermodynamics. On this basis, a comprehensively defined sustainability—the preservation of the Earth’s life-support systems—will be presented: a first natural-science based theory of sustainability; its core is using entropy as the sustainability criterion. The criterion is objective, and the results are falsifiable after applying the criterion. The criterion is applied as an example to several major technological processes.

Furthermore, it is shown that

- “climate-neutral” does not automatically mean “sustainable”;
- technological measures for climate stabilization (reducing atmospheric CO₂ concentrations) are unsustainable in their extreme forms.

Sustainable approaches (natural and renaturalized ecosystems as well as organic farming) are briefly discussed. Further reading can be found via the references.

Zusammenfassung

Drei Aspekte sind die Motivation für die Entwicklung des Konzepts, das im Vortrag¹, der diesem Artikel zugrundeliegt, vorgestellt wird: „Nachhaltigkeit“ ist ein inflationär verwendeter und im Wesentlichen für politisches und kommerzielles Marketing missbrauchter Begriff geworden.

- Thermodynamik und v.a. Entropie werden nur sehr eingeschränkt und zumeist falsch verstanden, die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik ist so gut wie unbekannt, selbst bei Naturwissenschaftlern.
- In der Klimaforschung und der Diskussion um klimastabilisierende Maßnahmen spielt Thermodynamik praktisch keine Rolle.

¹ Lecture presented at the Leibniz Society of Sciences on March 12, 2026 / Vortrag gehalten vor der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften am 12. 3. 2026, Präsentation hier zu finden: https://www.bernhard-wessling.com/vortrag_entropie_nachhaltigkeit_ls

Es wird gezeigt, wie Entropie im nicht-gleichgewichts-thermodynamischen Rahmen sehr lebensnah verstanden und vermittelt werden kann. Auf dieser Grundlage wird ein umfassend definiertes Nachhaltigkeitskonzept – die Erhaltung der lebenserhaltenden Systeme der Erde – vorgestellt: eine erste naturwissenschaftlich fundierte Theorie der Nachhaltigkeit, deren Kern darin besteht, Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit heranzuziehen. Das Kriterium ist objektiv, und die Ergebnisse sind nach Anwendung des Kriteriums falsifizierbar. Das Kriterium wird an einigen größeren technologischen Verfahren beispielhaft angewendet.

Darüber hinaus wird gezeigt, dass

- „klimaneutral“ nicht automatisch auch „nachhaltig“ ist;
- technologische Maßnahmen zur Klimastabilisierung (Erniedrigung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre) in extremer Form nicht-nachhaltig sind.

Nachhaltige Vorgehensweisen (natürliche und zu renaturierende Ökosysteme sowie Biolandwirtschaft) werden kurz angesprochen. Auf weiterführende Literatur wird verwiesen.

Keywords/Schlüsselwörter

sustainability, thermodynamics, non-equilibrium thermodynamics, entropy, climate change, species decline

Nachhaltigkeit, Thermodynamik, Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik, Entropie, Klimawandel, Artenschwund

1. Hintergrund

Seit Anfang der 1990er Jahre wird der Begriff „Nachhaltigkeit“ immer häufiger verwendet. Inzwischen wird er zum Teil sinnentleert als Modewort in der Werbung für Produkte und Dienstleistungen sowie für politische Programme und Entscheidungen verwendet. Dabei wird zumeist nicht einmal begründet, inwiefern das Objekt der Werbung nachhaltig sei.

Der Begriff wurde im sog. Brundtland-Bericht der Vereinten Nationen 1987 erstmalig zu definieren versucht (United Nations General Assembly 1987). Dort wird er als ausgesprochen anthropozentrisch verstanden: Es geht darum, die Bedürfnisse der Menschen (die selbst schon schwammig beschrieben werden) auch künftiger Generationen zu ermöglichen. 2015 wurde dies mit den 17 „Sustainable Development Goals“ näher definiert.² Aber auch innerhalb der jeweiligen Kapitel wird es nicht viel präziser.

Es gab trotz aller Bemühungen mittels Ökobilanzen und „life cycle analyses“ bisher keine naturwissenschaftliche Theorie der Nachhaltigkeit (wie Obura et al 2026 darlegen), kein übergreifendes, alle Umweltverbräuche zusammenfassend beschreibendes Kriterium, mit dem Nachhaltigkeit objektiv gemessen und verglichen werden kann, auch nicht mittels Wertermittlung in Form von Geld.³ Sie selbst stellen in der Veröffentlichung aber auch

² <https://sdgs.un.org/goals> Diese 17 Ziele lauten: 1 Keine Armut, 2 Kein Hunger, 3 Gesundheit und Wohlergehen, 4 Hochwertige Bildung, 5 Geschlechtergleichstellung, 6 Sauberes Wasser und Sanitärversorgung, 7 Bezahlbare und saubere Energie, 8 Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum, 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur, 10 Weniger Ungleichheiten, 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden, 12 Verantwortungsvoller Konsum und Produktion, 13 Klimaschutz, 14 Leben unter Wasser, 15 Leben an Land, 16 Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen, 17 Partnerschaften für die Ziele.

³ Obura et al (2026) schrieben: „*Although sustainable development is an agreed vision for all countries, it lacks theoretical grounding.*“ Poritosh et al (2009) versuchten, als allgemeines Nachhaltigkeits-

keine Theorie vor (jedenfalls keine in naturwissenschaftlichem Sinn), sondern ein wiederum nur qualitatives Modell; darin wird aber immerhin als Voraussetzung für das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen formuliert, dass die Leistungsfähigkeit und Funktionen der Natur sowie die Ressourcen der Erde bewahrt werden müssten.

Die Autoren eines Übersichtsartikels über Lebenszyklusanalysen stellen fest, dass diese sehr kompliziert sind, sehr viele Kategorien enthalten und somit eine abschließende, zusammenfassende Bewertung schwerfällt. Sie suchen daher nach einem einzigen Öko-Index, der ihrer Meinung nach in der Preisgestaltung („Yen“, japanische Währung) zu finden ist oder gefunden werden sollte. Allerdings erfordern diese wie auch andere Eco-Indices immer das subjektiv gefärbte Urteil von Expertengremien. Im Falle von „Yen“ (oder Euro) als Index würde ein solches Gremium eine (vermutete) Zahlungsbereitschaft der Menschen zu beschreiben versuchen.

Erste quantitative Zielsetzungen wurden 2009 in Form von „planetary Boundaries“ formuliert (Rockström, Steffen, Schellnhuber et al, 2009), die ein paar Jahre später weiterentwickelt wurden (Steffen et al, 2015). In der unten dargestellten Tabelle sind die (vom Autor zusammengefassten) Beschreibungen und Werte zu finden. Es ist für die gesellschaftliche Diskussion sehr wertvoll, solche wissenschaftlich erarbeiteten und diskutierbaren planetarischen Grenzen definiert zu bekommen. Jedoch sind auch diese nicht operabel in einem Sinne, dass diese dabei helfen könnten, vor Einführung von Produkten bzw. Verfahren zu beurteilen, welche nachhaltiger bzw. weniger nicht-nachhaltig sind als ihre Alternativen.

Erdsystemprozess	Steuergrößen	Planetarische Grenze	Aktueller Status ⁴ (Wert von 2015)
Klimawandel	CO ₂ -Konzentration (ppm) Energieungleichgewicht in der oberen Atmosphäre	350 ppm CO ₂ +1 W/m ²	423 (398,5) +2,97 (2,3)
Veränderung der Biosphärenintegrität	Aussterberate pro 1 Mio. Arten Index der intakten Biodiversität (BII) ⁵	<10 Aussterbefälle/1 Mio. BII bei >90 % halten	>100 (100–1000) (84 %)
Abbau der stratosphärischen Ozonschicht	O ₃ -Konzentration, DU ⁶	<5 % Abnahme gegenüber dem vorindustriellen Niveau von 290 DU	Über der Antarktis überschritten
Ozeanversauerung	Durchschnittliche Karbonat-Ionen-Konzentration	≥80 % des vorindustriellen Zustands	(~84 %)
Biogeochemische Kreisläufe: (P- und N-Kreislauf)	P-Fluss in den Ozean	11 Tg P/Jahr	4,4 (regional überschritten)
	N-Fluss	62 Tg N/Jahr	165 (22)
Veränderung des Landnutzungssystems	% Waldfläche im Vergleich zur ursprünglichen Vegetationsdecke	0,75	59 (62)
Süßwasserverbrauch	maximale Menge in km ³ /Jahr	4000 km ³ /Jahr / 12,9 % ⁷	22,6 %
Atmosphärische Aerosolbelastung	Optische Aerosolstärke, regional	0,25 AOD	(0,3)
Einführung neuer Chemikalien	Noch keine Definition der Kontrollvariablen	- ⁸	-

Tabelle: Vereinfachter, zusammengefasster Inhalt von Tabelle 1 in Steffen et al. (2015), aktualisiert nach FN 4.

Es wäre deshalb sinnvoll und für die Diskussion – und v. a. für technische sowie politische Entscheidungen – sehr hilfreich, wenn eine rein naturwissenschaftlich fundierte Theorie mit einem Kriterium entwickelt werden könnte, mit dem der Grad der Nachhaltigkeit von Verfahren bzw. Produkten im Vergleich zu Alternativen beurteilt werden kann.

Ein solches Kriterium muss den Verbrauch von Umweltgütern aller Art quantitativ beschreiben können. Dazu muss generell auch die Leistungsfähigkeit der Natur, somit also die Artenvielfalt, mit erfasst werden. Es ist derzeit ein grundlegendes Problem zu beobachten: Alles, was mit dem Klimawandel zusammenhängt, bekommt etwa 100mal mehr Aufmerksamkeit als alles im Zusammenhang mit dem Artenschwund. Wenn man aber die Schwere der beiden Krisen objektiv betrachtet, wäre klar, dass beide Krisen etwa die gleiche Aufmerksamkeit bekommen müssten, und nicht nur Aufmerksamkeit, sondern vor allem Investition von Personal, Zeit und Geld in Forschung, Entwicklung und Umsetzung von Lösungen der Krisen.

⁴ In dieser Spalte werden aktualisierte Werte angegeben, nicht die in FN 2 für 2014/2015 gemeldeten, sondern die für 2025, vgl. https://publications.pik-potsdam.de/rest/items/item_32589_5/component/file_33151/content, (in Klammern: Wert gemäß Bericht von Steffen et al 2015)

⁵ Dieser Index dient zur Beurteilung der funktionalen Ökosystemvielfalt von Regionen und wurde vom National History Museum, GB, entwickelt: <https://www.nhm.ac.uk/our-science/services/data/biodiversity-intactness-index.html>

⁶ DU: Dobson-Einheit, vgl. https://en.wikipedia.org/wiki/Dobson_unit

⁷ Die Einheiten wurden nach⁴ in % der eisfreien Landfläche mit starken Abweichungen bei der Wasserführung (nass oder trocken) geändert

⁸ Dies wurde aktualisiert nach⁴ zur Überwachung des „Prozentsatzes synthetischer Chemikalien, die ohne angemessene Sicherheitsprüfungen in die Umwelt freigesetzt werden“, doch liegen bislang keine Zahlen vor, außer der Angabe „>0“

Und es müsste klar sein: Es dürfen keine Maßnahmen zur Lösung der einen Krise ergriffen werden, durch die die andere Krise vernachlässigt, wenn nicht sogar verschärft werden könnte. Ein Kriterium für Nachhaltigkeit, das dringend erforderlich ist, muss in der Lage sein zu erfassen, ob die eine oder andere Maßnahme zur Lösung einer Krise solch ein Risiko beinhaltet oder nicht.

Erschwerend kommt seit einiger Zeit hinzu, dass Klimaneutralität mit Nachhaltigkeit praktisch gleichgesetzt wird: Alles, was (und sei es angeblich netto) ohne CO₂-Emissionen „klimaneutral“ betrieben, verwendet oder hergestellt werden kann, wird schnell für nachhaltig erklärt. Wie fraglich das ist, kann man z.B. an der Erzeugung und Verbrennung von „Bio“gas und an der angeblich klimaneutralen Verwendung von Holz für Heizzwecke erkennen: Es wird der Effekt auf die Böden und die Artenvielfalt und bei der Holzverbrennung die Emission gefährlicher Luftschadstoffe ignoriert.

2. Ausgangspunkt der Suche nach einem solchen Kriterium

Eine geeignete Nachhaltigkeits-Theorie kann am besten in der Thermodynamik, dabei v.a. unter Einbeziehung der Prigogine'schen Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik, gesucht werden. Dies ist deshalb sinnvoll, weil sämtliche Vorgänge in der Welt, die uns im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit interessieren, Energie- und Stoffumsatz erfordern oder beinhalten. Und Vorgänge mit Energie- und Stoffumsatz sind genau der Kern der Thermodynamik.

Dabei ist v.a. wichtig zu beachten: Da wir die Leistungsfähigkeit und Funktionen der Natur sowie die Ressourcen der Erde bewahren wollen, müssen wir erkennen, was das Wesentliche an der Natur ist. Es ist die Tatsache, dass unzählige stoffliche Bestandteile sich selbst-organisierend, also ohne einen von außen wirkendem dirigierendem Einfluss, zu sog. „dissipativen Strukturen“ (von Ilya Prigogine, dem Schöpfer der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik und Nobelpreisträger, geprägter Begriff, Nobelkomitee 1977) zusammengefunden haben. Kleinste (Einzeller) und kleine und größere solche Strukturen (Vielzeller und Organismen) bilden Lebensgemeinschaften (Ökosysteme), in denen und von denen auch wir Menschen leben. Wir haben zusätzlich noch Gesellschaften mit Infrastruktur und vernetzten Wirtschaftssystemen entwickelt. Das alles ist Komplexität (vgl. Weßling 2025).

Sie entsteht in offenen Systemen, die sich aufgrund von überkritisch hohem Energieeintrag weitab vom thermodynamischen Gleichgewicht befinden. Diese Systeme entwickeln komplexe dissipative Strukturen, begleitet von Entropie-Export. Komplexe Strukturen sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Muster aufweisen, aber keine Regelmäßigkeit wie Kristalle mit ihren Elementarzellen (die „Ordnung“ aufweisen); komplexe Strukturen lassen sich nicht mit einem mehr oder weniger einfachen Algorithmus beschreiben. Sie sind im Detail jeweils einzigartig, seien es Galaxien, Baumkronen mit ihrem Geäst, oder Schneeflocken (Beispiele in B. Wessling 2026a).

Es ist außerordentlich bedauerlich und erschwert einen umfassenden Zugang zu einer nicht-gleichgewichts-thermodynamischen Betrachtung der aktuellen Umweltkrisen, dass diese moderne Thermodynamik in der Allgemeinbildung (z.B. in Form von populärwissenschaftlichen Büchern) komplett und in der universitären Ausbildung nahezu komplett fehlt. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass die Entropie weithin gar nicht oder fälschlich einseitig als Indikator für Unordnung verstanden wird. Hinzu kommt die Verwirrung, die die Verwendung des Begriffs „Entropie“ für gänzlich andere Phänomene in der Informationstheorie und der Quantenphysik hervorruft. Entropie muss rein thermodynamisch im Sinne von Prigogine verstanden werden.

3. Vorschlag zur Diskussion: Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit, der Kern einer naturwissenschaftlichen Theorie der Nachhaltigkeit

Daraus ergibt sich meine Theorie eines einheitlichen, allgemeingültigen Kriteriums der Nachhaltigkeit: die Entropie. Seit 2023/24 stelle ich sie zur Diskussion, so auch hier als Zusammenfassung meines Vortrags vom 12. 3. 2026 (FN 1).

Entropie ist ein Indikator für Verlust an Wertigkeit von Energie (und Materie, die ja auch Energie ist bzw. enthält). Je weniger nutzbar eine Energieform ist, umso mehr Entropie enthält sie. Das kann man anhand der Wärme gut erkennen: Eine Wärmequelle mit hoher Temperatur ermöglicht die Erzeugung von elektrischem Strom; mit solcher niedrigerer Temperatur lassen sich Wohnungen auf angenehme Temperaturen erwärmen; Luft von -20°C und auch solche von -90°C enthält immer noch Wärme – aber das ist eine (für uns und auch in der Natur) nicht mehr nutzbare Energieform.

Die Sonne liefert der Erde ein Energieeinkommen; sie strahlt die praktisch gleiche Menge als Entropie ab, und zwar in Form von langwelliger Infrarotstrahlung. Diese hat eine Effektivtemperatur von ca. -18°C (Penn State College). Die Menschheit verwendet seit der Bronzezeit, also seit etwa 3.700 Jahren, Kohle als Brennstoff (GEO Wissen 2023). Die Verhüttung von Kupfer (mit Hilfe von Holzkohle) ist noch älter. Mit der Verwendung von Kohle und Erz begann die Menschheit, Umweltgüterkapital zu nutzen. Der Verbrauch von Umweltgütern aller Art führt zu Entropieproduktion. Das betrifft auch komplexe dissipative Strukturen (Ökosysteme): Wenn diese geschädigt oder zerstört werden, wenn die Artenvielfalt verringert wird, entspricht dies einem Entropieanstieg (denn umgekehrt entsprach die Entstehung dieser komplexen Strukturen einer Verringerung der Entropie, sie wurde exportiert, und zwar in Form von langwelliger Infrarotstrahlung in den Weltraum).

Letztlich manifestiert sich Entropie nicht nur in Form von Abwärme, sondern auch stofflich in Form von Abfällen aller Art (Asche, Abraum aus Kohle- und Erzabbau, Haushalts- und Industrieabfälle).

Das Wesen dieses Entropie-Kriteriums der Nachhaltigkeit ist: Dasjenige Produkt oder Verfahren A, das im Vergleich zu mehr oder weniger gut vergleichbaren Alternativen B, C, D ... weniger (nicht-abstrahlbare) Entropie produziert bzw. dessen Entropiebilanz geringer „negativ“ ist, ist als nachhaltiger, genauer: als weniger nicht-nachhaltig anzusehen. Hierzu sind nun folgende Klarstellungen notwendig:

1) Solange die Menschheit nicht regenerierbare Rohstoffe benötigt, um Maschinen, Produkte und Infrastruktur herzustellen (wozu dann auch immer Energie benötigt wird), kann sie nicht tatsächlich langfristig nachhaltig wirtschaften. Derzeit können wir lediglich ermitteln, welche Verfahren bzw. Produkte im Vergleich zu ihren jeweiligen Alternativen weniger nicht-nachhaltig sind.

2) Eine Entropiebilanz eines Verfahrens (bzw. einer Reihe von Verfahren, an deren Ende ein fertiges Produkt steht) besteht einerseits aus Effekten, durch die Entropie exportiert wird; diese ist rechnerisch negativ, in der Bewertung aber als Entropie-Nutzen (positiv) anzusehen; andererseits sind, um Entropie aus einem System heraus exportieren zu können, muss zwangsläufig sehr viel Energie aufgewendet werden, was eine hohe Entropieproduktion verursacht. Hinzu kommt der Materialaufwand, der direkt und indirekt mit den Verfahren verbunden ist: Auch dieser verursacht Entropieproduktion.

Industrie, Verkehr und Haushalte verursachen neben Abwärme vor allem nicht-abstrahlbare Formen von Entropie, einerseits in Form von Abfällen, andererseits in Form von Zerstörung von funktionierender, nützlicher, hochwertiger Komplexität. Diese Entropie geht in eine Entropie-Bilanz mit einem Pluszeichen ein (Entropieanstieg), ist in der Bewertung aber negativ (Entropie-Schaden).

Letztlich kommt es für möglichst minimal nicht-nachhaltige Verfahren darauf an, zum einen viel (abstrahlbaren) Entropie-Export zu erzielen, zum anderen möglichst wenig nicht-abstrahlbare Entropie zu erzeugen. Die Bilanz wird aber nominell (rechnerisch) immer positiv sein, es wird mehr nicht-abstrahlbare Entropie (*Entropie-Schaden*) erzeugt, als abstrahlbare zusammen mit (abstrahlbarem) Entropie-Export (*Entropie-Nutzen*). In der Summe bewerten wir den (zumeist drastischen) Überschuss an *Entropie-Schaden* mit Blick auf Nachhaltigkeit als negativ.

3) Besonders in den Anfängen der Verwendung des Entropie-Kriteriums wird es mangels Daten und mangels Untersuchungs- und Rechenkapazität schwierig sein, einigermaßen vollständige Entropiebilanzen zu erstellen, selbst wenn man sich auf die wesentlichen Entropiebeiträge beschränkt. Hierzu schlage ich vor, die in den 1980er/90er-Jahren vom Wuppertal-Institut entwickelte Kennzahl MIPS (Materialintensität pro Serviceeinheit) (Schmidt-Bleek 1993) zu verwenden. Sie ist ein ausgezeichnete Indikator für Entropieproduktion, da die gesamten Materialbewegungen für einen Rohstoff (und mithin am Ende für ein komplettes Produkt), inkl. Wasser und Luft, erfasst und zusammengezählt werden. Daten für unterschiedlichste Rohstoffe und Energiequellen sind hier zu finden (Wuppertalinstitut). Auch bei der Anwendung der MIPS (in Tonnen pro Serviceeinheit) ist das Ergebnis eindeutig: Das Verfahren mit der geringeren Kennziffer ist weniger nicht-nachhaltig.

4) Sowohl das Entropie-Kriterium als auch die gröber auflösende MIPS stellen eine quantitative, objektive und zugleich falsifizierbare Beurteilung der Nachhaltigkeit (bzw. Nicht-Nachhaltigkeit) dar. Das ist ein enormer Vorteil gegenüber Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen, die mit ihren – selbst für vergleichbare Verfahren bzw. Produkte – oft nicht deckungsgleiche Kategorien aufweisen. Wie soll z. B. der Unterschied der Nachhaltigkeit eines Verfahrens beurteilt werden, für das die Energie entweder über Solarenergie oder (mit PV-Strom erzeugtem) Wasserstoff oder Biogas bereitgestellt wird? Die entsprechenden Ökobilanzen weisen teilweise vollkommen unterschiedliche Kategorien auf, eine abschließende Beurteilung erfordert immer subjektive Urteile, welche Kategorie gegenüber anderen als schwerwiegender bzgl. Nachhaltigkeit angesehen wird.

4. Anwendungsbeispiele

Aus dem Vortrag soll hier nur kurz angerissen werden, welche Beispiele quantitativ vorgestellt wurden und mit welchem Ergebnis, nicht aber die dafür gewählte Datenbasis und der Rechenweg dorthin. Das kann in Ansätzen im Vortrag selbst nachgelesen werden, im Detail in den Ende 2026 erscheinenden Büchern (Wessling 2026c). Näher analysiert wurden bisher u. a.:

- **Korrosion und Korrosionsschutz:** Jährlich gehen weltweit durchschnittlich 3,4% des Bruttosozialprodukts durch Korrosion verloren. Die Entropieproduktion pro Tonne verlorenen (korrodierten) Stahls aufgrund des Energieverbrauchs (mehr als 68,22 MJ/K (20 °C) pro Tonne Rohstahl, d. h. ca. 4,1 EJ/K (EJ: Exa-Joule, 10^{18} J) pro Jahr bei weltweit ca. 60 Millionen Tonnen) kann um bis zu den Faktor 10 reduziert werden, wenn die neuartige Technologie „Passivierung durch ein Organisches Metall“, die vom Autor entwickelt wurde (Wessling 2010, Wessling 1999), eingesetzt würde.

- **Leiterplatten** benötigen nach der Fertigstellung, bevor die elektronischen Bauelemente in automatischen Anlagen darauf platziert und verlötet werden, eine **Endoberfläche**, die die offenen Kupfer-Kontaktstellen vor Oxidation schützt und für die spätere Bestückung die notwendige **Lötfähigkeit** absichert. Hierzu hat der Autor mit den Teams in seinem Unternehmen eine ebenfalls auf dem Organischen Metall basierende Technologie (Wessling 1999b) entwickelt und erfolgreich im Weltmarkt eingeführt. Damit konnte zum

Teil ein bleihaltiges (umweltgiftiges und für moderne Leiterplatten zunehmend ungeeignetes) Verfahren, zum größeren Teil mit einer aus Mikrometer-dünnen Schichten von Nickel und Gold bestehende Endoberfläche ersetzt werden. Die MIPS-Analyse ergab pro m² beschichteter Cu-Oberfläche (entspricht etwa 10 m² Leiterplattenfläche):

- a) für Nickel/Gold 1,6 t Materialbewegung
- b) für die neue (Anfang der 2000er Jahre in den Markt eingeführte) OMCSN-Technologie 0,142 t, das entspricht einer Reduktion um mehr als den Faktor 11 auf 8,9% der vorherigen Umweltbelastung.

Für die damit im Markt jährlich etwa 20 Mio. m² beschichteten Leiterplatten entspricht dies einem Materialaufwand (und einer entsprechenden Umweltbelastung) in Höhe von 284.000 Tonnen, wenn diese Leiterplatten mit Nickel/Gold beschichtet würden, wären es 3,4 Mio. Tonnen.

- Eine noch **sehr viel größere Umweltentlastung** wäre möglich gewesen durch die industriell erfolgreich erprobte Weiterentwicklung zu einer nur nominell 50 Nanometer dünnen Schicht (Wessling 2007). Diese würde den MIPS-Kennwert auf nur noch 327 Gramm pro m² Kupfer-Oberfläche vermindern, entsprechend 0,02% der Belastung durch Nickel/Gold bzw. 0,23% der Belastung durch OMCSN. Aus sowohl technischer wie auch wirtschaftlicher Sicht inakzeptablen Gründen, die hier nicht erläutert werden können, hat der Käufer des Unternehmens des Autors diese Technologie trotz Akzeptanz bei ersten Kunden nicht eingeführt.

- Eine **Eisen-basierte Energie-„Kreislauf“-Wirtschaft** wird weltweit erforscht (Debiagi et al., 2022; Neumann et al. 2024). Diese soll angeblich klimaneutral und nachhaltig die Lösung der nicht verlässlich gleichmäßig verfügbaren regenerativen Energie (Sonne, Wind) darstellen, sodass Gaskraftwerke nicht benötigt würden. Hierzu soll Fe-Pulver in umzurüstenden (ansonsten stillzulegenden) Kohlenkraftwerken verbrannt werden; das dabei entstehende Eisenoxid-Pulver soll nach Nordafrika verschifft und mittels dort in der Sahara in großen Solaranlagen erzeugtem Wasserstoff reduziert werden zurück zum Eisenpulver. Die Entropie-Analyse ergibt: netto 700 kWh Strom (nach Abzug des Stromaufwands aus der PV-Anlage zwecks H₂-Erzeugung) gewinnbar aus 1 Tonne Eisenpulver würden 29 MJ/K an Entropieproduktion „kosten“; die Direktnutzung des erzeugten PV-Stroms hingegen würde nur 3 MJ/K Entropie verursachen. Damit wird das Argument, diese Technologie sei nachhaltig, weil klimaneutral und die benötigte Energie sei regenerativ erzeugt, als nicht stichhaltig erkannt: 26 MJ/K, also fast eine fast 10mal größere Entropieproduktion ist wesentlich nicht-nachhaltiger.

- **„Direct air capture“ (DAC) zum Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre** erfordert das Dreifache an Energie im Vergleich zu der nutzbaren Energiemenge, die bei der Verbrennung z. B. von Erdgas bereitgestellt wurde. Im Vergleich zur Entropieabsenkung in der Atmosphäre (Entropie-Nutzen von DAC: 4,15 MJ/K pro Tonne CO₂) wird aber Entropie produziert in Höhe von 23 MJ/K (Entropie-Schaden von DAC), fast 6mal so viel Schaden wie Nutzen. Das zeigt ebenfalls, wie sehr nicht-nachhaltig diese Technologien sind.

- Zusätzlich wurden diverse **Geoengineering**-Ansätze untersucht, die sämtlich in krassem Umfang nicht-nachhaltig sind (SO₂ in die Stratosphäre blasen; Makroalgenfarmen im Ozean; Basalt vermahlen und verwittern lassen). Hierzu wird auf den Vortrag¹ und auf die bald erscheinenden Bücher (Wessling 2026c) verwiesen.

Es ist wichtig zu wissen, dass die Entropie zwar angeben kann, wie viel Umweltgüter insgesamt verbraucht wurden (in der Entropieeinheit J/K), aber nicht, welche genau diese Umweltgüter sind. Darin kann alles von Rohstoffen über Landschaft, Boden, Wasser oder Umweltvergiftung bis hin zu Artenschwund uvm. enthalten sein. Insofern kann und soll

das Entropiekriterium andere bestehende Untersuchungsmethoden (Ökobilanzen, Lebenszyklusanalysen) nicht ersetzen, sondern ergänzen und für diese eine zusammenfassende Bewertung liefern.

5. Die Alternative: natürliche Prozesse

Der Klimawandel und der Artenschwund müssen gleichzeitig und mit den gleichen Vorgehensweisen gelöst werden. Das ist die einzige tatsächlich nachhaltige Alternative. Die Grundlagen dafür sind hier (näheres bei Wessling 2026a, b, c) zu finden:

- a) Prozesse im Boden, wenn sich die Böden vielfältig bewachsen und ohne Pestizid-Einsatz sowie ohne chemische Düngemittel lebendig entwickeln können, erlauben die Speicherung gewaltiger Mengen an CO₂ in Form von letztendlich stabilen mineralisch-organischen Komplexen C-haltiger Verbindungen; das trifft für organische Biolandwirtschaft ebenso zu wie für Misch- und vor allem Dauerwälder;
- b) Moore und andere Feuchtgebiete speichern noch wesentlich mehr CO₂, als Böden auf biologisch organisch bewirtschaftetem Acker- und Weideland dies vermögen; dies trifft ebenso für die Böden der Ozeane zu, wenn – wie die Staaten der UN es für 2030 beschlossen haben – 30% der Ozeane unter Schutz gestellt werden; bisher sind 10,1% unter Schutz, aber diese Zielmarke wurde mit 5 Jahren Verspätung erreicht und betrifft weitgehend nationale und noch nicht internationale Meeresflächen (UNEP 2026);
- c) mit den Vorgehensweisen und a) und b) lässt sich nicht nur der Klimawandel zuerst mildern, dann stoppen und langfristig umkehren, sondern der gleiche Effekt kann für den Artenschwund wirksam werden: zuerst bremsen, dann aufhalten, schließlich die Artenvielfalt wieder steigern;
- d) die bei all diesen Prozessen zwangsläufig entstehende Entropie wird bis auf die von der Menschheit bei Renaturierungsprozessen durch die erforderlichen technischen Eingriffe (und bei der naturnahen land- und forstwirtschaftlichen Nutzung von Flächen) entstehende Entropie von der Erde abgestrahlt.

6. Weitere Forschung

Die seit 2023/24 zunehmend detaillierter vorgelegte, aber immer noch sehr neue Theorie, Entropie als quantitatives, objektives und falsifizierbares Kriterium für Nachhaltigkeit zu verwenden, bedarf selbstverständlich weiterer Forschung. Entropie- und MIPS-Daten, Berechnungswege und -Kapazitäten müssen vertieft, verbreitert und verfeinert werden. Bislang kann die Methode zwar bereits deutliche Trends aufzeigen, aber für eine breite und gesellschaftlich produktive sowie umweltpolitisch wirkungsvolle Anwendung sind die quantitativen Aussagen noch zu grob und zu lückenhaft. Das könnte mit sehr viel mehr personeller, finanzieller und computer-unterstützter Forschungskapazität schnell verbessert werden. Dabei wird es auch möglich sein, die notwendigen sozialen Aspekte der Nachhaltigkeit einzubeziehen.

Ein weiteres sinnvolles Forschungsgebiet ist die Anwendung der Entropie auch in der Wirtschaftswissenschaft. Im Buch (Wessling 2026c) wird ansatzweise der Gedanke entwickelt, dass es direkte Verbindungen zwischen Entropie, Kosten und Inflation und somit mit dem Finanzsystem gibt (auch hier können und müssen soziale Aspekte eine Rolle spielen). Diesen Ansatz sollten Thermodynamiker und Wirtschaftswissenschaftler gemeinsam erforschen. Daraus kann sich ein praktisch umsetzbares Konzept für eine „Entropie-Wirtschaft“ entwickeln, ein Konzept, das weit über frühere eher deklamatorische (und mit dem irreführenden Entropiebegriff aus der Informationstheorie

unwirksam ausgerichtet) Erwähnungen (Georgescu-Roegen 1971; Galbraith 2025) von Entropie im Zusammenhang mit der Ökonomie hinausgeht.

Bibliografie

Debiagi, Paolo; Hasse, Christian et al (2022) Iron as a sustainable chemical carrier of renewable energy: Analysis of opportunities and challenges for retrofitting coal-fired power plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 165, 2022, 112579, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112579>

Galbraith, James; Chen, Jing; "Entropy Economics", The University of Chicago Press, 2025

GEO Wissen (2023): <https://www.geo.de/wissen/forschung-und-technik/kohle-als-brennstoff-schon-vor-3700-jahren-33697086.html>

Georgescu-Roegen, Nicholas (1971), "The Entropy Law and the Economic Process", Harvard University Press, 1971

Neumann, Jannik; Hasse, Christian et al. (2024), Thermodynamic assessment of an iron-based circular energy economy for carbon-free power supply, *Applied Energy*, Vol. 368, 2024, 123476, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123476>

Nobelkomitee 1977, vgl. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/summary/>, <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/press-release/> [3. 4. 2026]

Obura, David; Agrawal, Arun; Christie, Michael et al., A systems reset for sustainable development. *Commun. Sustain.* 1, 3 (2026). <https://doi.org/10.1038/s44458-025-00009-3>

Penn State College of Earth and Mineral Sciences
<https://courses.ems.psu.edu/meteo300/node/647>

Poritosh, Roy; Shiina, Takeo et al, A review of life cycle assessment (LCA) on some food products, *Journal of Food Engineering*, Vol. 90, No. 1, January 2009, p. 1-10, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>, mit Referenzen zu Itsubo und Inada:

Itsubo, N., Inaba, A., 2003. A new LCIA method, LIME, has been completed. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (5), 305.

Itsubo, Norihiro; Inaba, Atsushi, 2007. Development of LIME2 – towards the establishment of a methodology for decision making. In: SETAC-Europe Annual Meeting 2007, SETAC-EU-0249-2007.

Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Schellnhuber, Hans-Joachim et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>

Schmidt-Bleek, Friedrich (1993), *Wieviel Umwelt braucht der Mensch?* Birkhäuser, 1993; DTV, Munich 1997, siehe auch https://de.wikipedia.org/wiki/Material-Input_pro_Serviceeinheit

Steffen, Will et al., Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855 (2015). [DOI:10.1126/science.1259855](https://doi.org/10.1126/science.1259855)

UNEP 2026 <https://www.unep-wcmc.org/en/news/world-reaches-milestone-for-nature-10-of-ocean-now-officially-protected>

- United Nations General Assembly (1987), Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> [3. 4. 2026]
- Wessling, Bernhard (2010), Die Technologie und v.a. die Wissenschaft dahinter kann hier nicht erläutert werden, vgl. aber <https://doi.org/10.3390/polym2040786> und darin zitierte Literatur; näheres zur Passivierung hier:
Wessling, Bernhard, (1999) Scientific Engineering of Anti-Corrosion Coating Systems based on Organic Metals, JCSE 1999, Vol 1, 15, https://www.researchgate.net/publication/286711419_Scientific_engineering_of_an_anti-corrosion_coating_systems_based_on_organic_metals_polyaniline
- vgl. auch Ormecon GmbH, Industrial reference reports 2008, https://www.researchgate.net/publication/264786505_Corrosion_Protection_using_Polyaniline_in_mass_production_scale_International_reference_and_test_objects_Report
- Wessling, Bernhard (1999a) Use of Organic Metal to enhance the operating window and solderability of immersion tin, Circuit World 25(4), 8-16 (1999), <https://doi.org/10.1108/03056129910290733>, cf. also https://www.researchgate.net/publication/233515116_Use_of_Organic_Metal_to_enhance_the_operating_window_and_solderability_of_immersion_tin
- Wessling, Bernhard (2007), European patent EP2062467B1, cf. <https://patents.google.com/patent/EP2062467B1/en?q=EP2062467B1>, vgl. technische Veröffentlichung: Wessling, Bernhard; Thun, Marco et al, An Organic Metal/Silver Nanoparticle Finish on Copper for Efficient Passivation and Solderability Preservation, Nanoscale Res Lett (2007) 2:455–460, <https://doi.org/10.1007/s11671-007-9086-0>
- Weßling, Bernhard (2025), Was für ein Zufall! Zum Ursprung von Unvorhersehbarkeit, Komplexität, Krisen und Zeit, SpringerNature 2025, <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-46427-1>
- Wessling, Bernhard (2026a), Sustainability through Bioagriculture: Carbon Dioxide Reduction (CDR) plus Biodiversity Recovery, Preprint Jan. 7, 2026, <https://doi.org/10.20944/preprints202508.0443.v3>
- Wessling, Bernhard (2026b), Entropy as a Criterion for Sustainability—CO₂ Removal and Storage or Utilization (CCS, CCU) Are Not Sustainable, <https://doi.org/10.20944/preprints202512.2416.v1>, mehr noch im Vortrag vom 12. 3. 2026 in https://www.bernhard-wessling.com/vortrag_entropie_nachhaltigkeit_ls
- Wessling, Bernhard (2026c), „Sustainability Reexamined: Towards a quantitative natural-science based Criterion“; „Nachhaltigkeit auf den Punkt gebracht: Ein naturwissenschaftlich fundiertes Kriterium“, jeweils SpringerNature, geplant für Ende 2026
- Wuppertalinstitut
https://wupperinst.org/fileadmin/redaktion/downloads/misc/MIT_2014.pdf