

Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit

Dr. Bernhard Weßling, Jersbek (Schleswig-Holstein), MLS seit 2025

- aktiv forschender Chemiker in kleinem Chemieunternehmen, schon früh zugleich Unternehmer geworden (Gesellschafter, Geschäftsführer)
 - Hauptziel immer: nachhaltig(er)e Produkte (früh mit Umweltschutz & Bericht des Club of Rome in Kontakt gekommen) (zugleich Grundlagenforschung)
 - im Markt in gleicher Richtung aktiv: initiierte 1987 ThinkTank „Kunststoffe und Umwelt“ u. a. mit Prof. Ernst-Ulrich von Weizsäcker (Wuppertal-Institut), Michael Müller (SPD-Umwelt-Politiker), Prof. Heydemann (damals Umweltminister in Schleswig-Holstein)
- außerberufliche Aktivität: Kranichschutz, Kranichforschung (national, international, Buch)
- nebenberuflich: Investor (2009) und (bis Juni 2025) Geschäftsführer eines Biolandwirtschafts-Betriebs (Acker- und Gemüsebau, Milchwirtschaft, Käserei, Rinder- und Schweinezucht, 7 eigene Hofläden, solidarische Landwirtschaft – 450 ha Pachtland)

Hintergrund für die Suche nach besserer Definition

Wo ist das Problem?

- Nachhaltigkeit ist – wenn ernst und umfassend gemeint – ein so wichtiges Konzept!
- Aber: nur sehr schwammige Definitionen für Nachhaltigkeit (beginnend mit Brundtland-Bericht 1987) und rein anthropozentrisch
- inzwischen wird alles schon als „nachhaltig“ bezeichnet, ohne es zu begünden
- Marketing-Leerformel für Politik und Unternehmen
- größter Mangel derzeit: „klimaneutral“ wird mit „nachhaltig“ gleichgesetzt.

Warum aber mit Thermodynamik an dieses Thema ran?

- ==> alle unsere Aktivitäten im Leben, Industrie, Infrastruktur sind im Kern Umsatz von Energie und Materie,
==> ebenso beruht alles in der Natur (und im Universum) auf Umsatz von Energie und Materie,
- **das ist der Gegenstand der Thermodynamik!**

„Artenschwund“: kein Raum bei öffentlicher Klimadiskussion



Klatschmohn, Rittersporn u. a.

Obwohl es alle wissen (Insekten, Acker-Wildkräuter und -Blumen, Vögel), beschäftigt sich die öffentliche Diskussion über Umweltkrisen zu >99% mit „Klimawandel“:

- Pressedatenbank „genios“ listet 1.322.756 Artikel zum Thema „Klimawandel“ auf, aber nur 11.414 über „Artenschwund“ = 0,8% (Abfrage am 16. 7. 2025).

- Im Hamburger Zukunftsentscheid wurde effektiv CCS beschlossen, im Forderungskatalog und den vorbereitenden Studien echt NULL Hinweise, nicht mal ein winziger, auf CO₂-Speicherpotenziale in Ökosystemen, geschweige denn auf Artenschwund.

„Nachhaltigkeit“ – eine hohle Phrase

*Es gibt bisher keine objektive Definition
für Nachhaltigkeit, alles sehr
schwammig, rein anthropozentrisch*

Nachhaltigkeit setzt voraus, dass
eine Maßnahme zur Lösung einer Krise
(z. B. Klimawandel)
keine schwerwiegenden Kollateralschäden
in anderen Sektoren der Umwelt verursacht.

- Und nicht die Lösung eines anderen Problems (Artenschwund) verhindert.
- Wie aber kann man objektiv feststellen, was „*schwerwiegend*“ ist?

„Nachhaltigkeit“ mit Entropie messen

Entropie ist klar definiert (wenn auch oft schwer zu berechnen), nicht anthropozentrisch, d.h., sie betrifft alle Vorgänge auf der Erde (die uns Menschen aber auch betreffen).

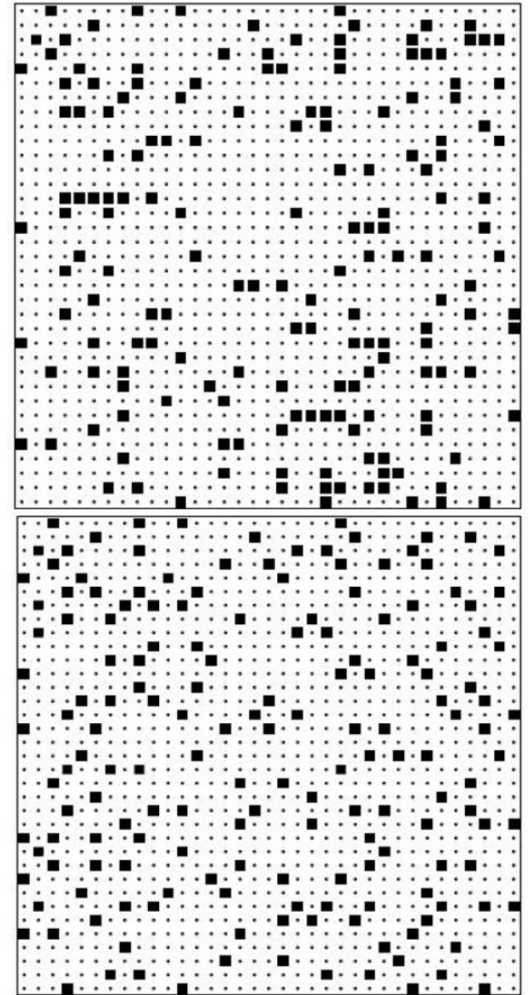
Mein Vorschlag zur Diskussion:

Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit

Was ist Entropie?

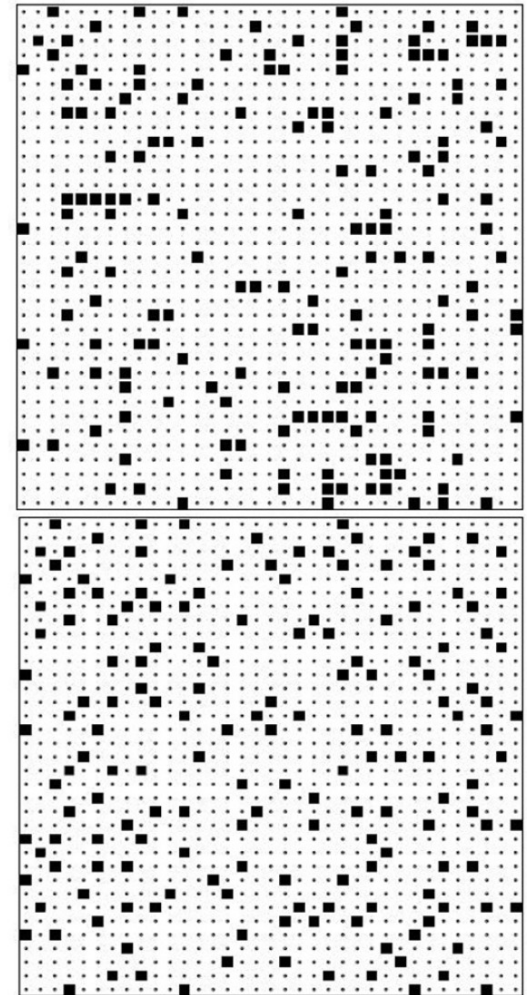
- ist „Entropie ein Maß für Unordnung“?
- Boltzmanns Interpretation der Entropie als $S = k \cdot \ln W$
- Welches der beiden Diagramme repräsentiert die größere Entropie?
- Beide Graphen wurden aus je einem Ensemble von ähnlicher Graphen willkürlich ausgewählt.

Welches der beiden Ensembles ist größer, das, aus dem der untere, oder das, aus dem der obere Graph entnommen wurde?



Was ist Entropie?

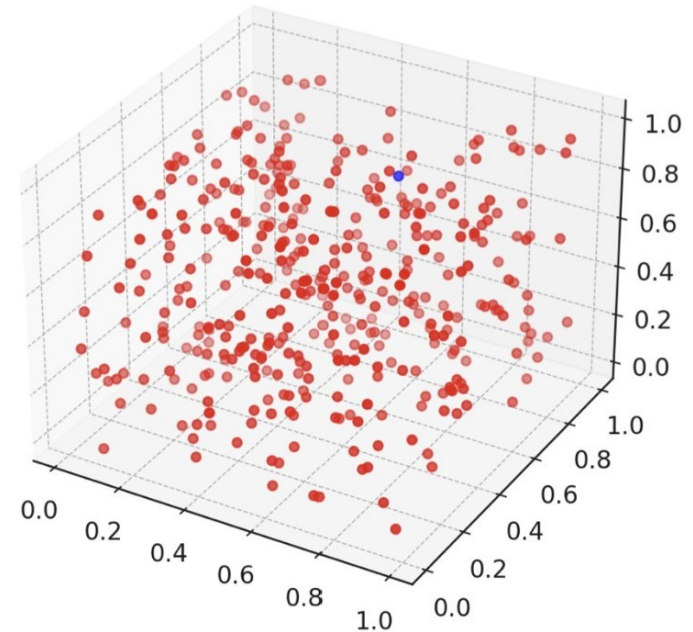
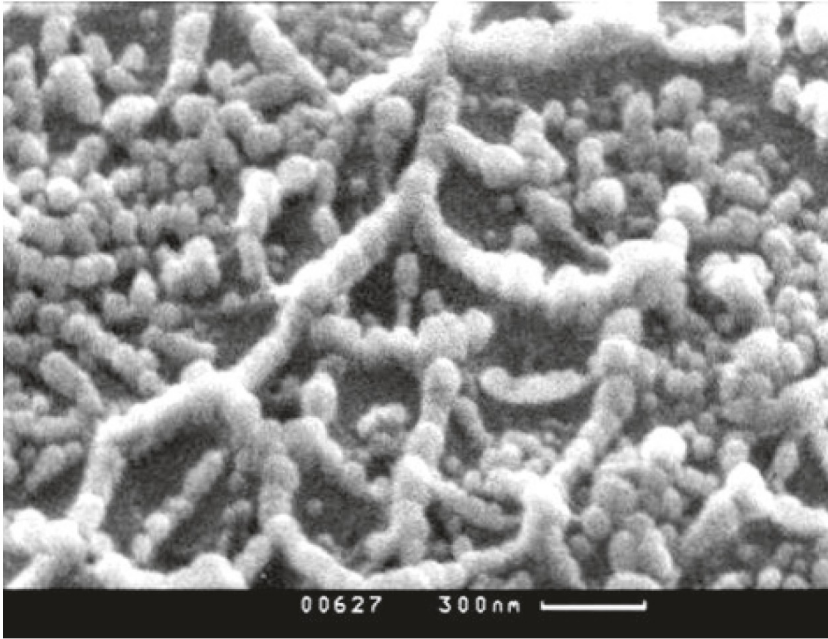
- Mißverständnis: Entropie = Unordnung, entstanden aus Boltzmanns Interpretation der Entropie als $S = k \cdot \ln W$ für Gase im Gleichgewicht.
- Welches der beiden Diagramme repräsentiert die größere Entropie? **keins von beiden, weil für beide fest definiert ist, welches Feld besetzt und welches frei ist; beide haben die Wahrscheinlichkeit 1**
- Beide Graphen wurden aus je einem Ensemble von ähnlichen Graphen willkürlich ausgewählt.
Welches der beiden Ensembles ist größer, das, aus dem der untere, oder das, aus dem der obere Graph entnommen wurde?
das obere!
- **Warum? Für das Ensemble des unteren Graphen zusätzlich die Regel, dass keine 2 Punkte sich berühren. Oben: keine Regel (außer: „Felder willkürlich mit Punkten besetzen“).**



Entropie lebensnah verstanden

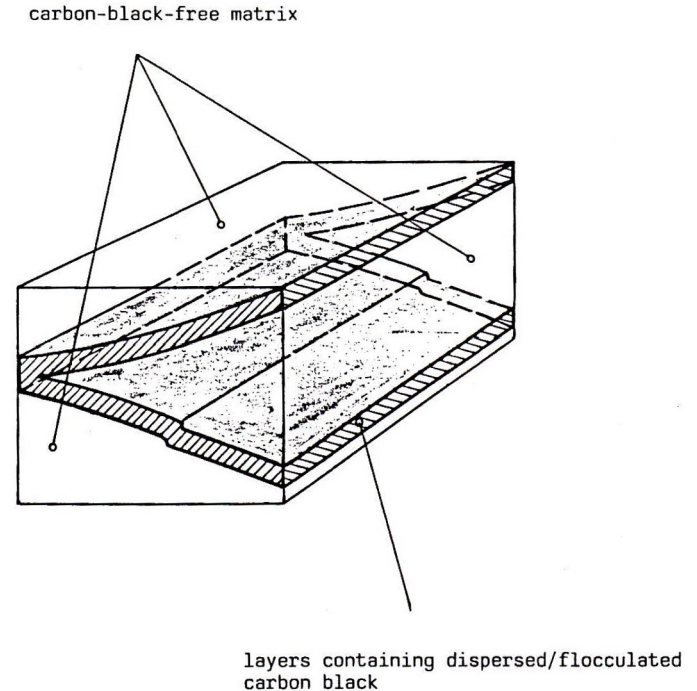
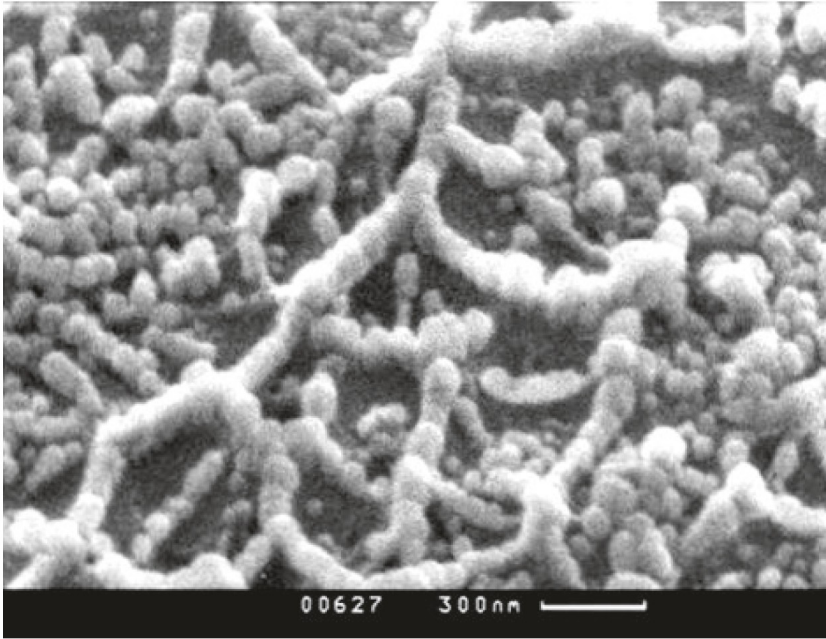
- Ganz generell: minderwertige oder nicht mehr nutzbare Energie; bildhaft ausgedrückt „Abfallenergie“ oder „Energieabfall“. **Wirkungsgrad**↓ ==> **Entropie**↑
- Stoffe (also: Materie) enthalten ebenfalls Energie (oder: sind eine Form von Energie). Es gibt „nicht mehr nutzbare“ Stoffe (Asche, CO₂) und Stoffgemische (Hausmüll): auch sie repräsentieren Entropie; diese aber kann nicht abgestrahlt werden.
- Nutzbarmachung von „Abfall“ erfordert Energie → Entropie (Wirkungsgradverlust)
- Beispiele: Eierschalen, Rost, Reifenabrieb, Hautschuppen, Urin, Kot, Asche, CO₂, Wärmeverluste (Körper, Wohnung), Krankheit, Altern, Herbst (Blätter); Mikroplastik, Wasser- und Luftverschmutzung („Mischungsentropie“), zerstörte Landschaften, Verlust von Umweltgütern
generell: Verfall, Verschleiß ==> **Entropie**↑
Typisches GG-System: Bildung von Lösungen (Zuckerlösung) **Entropie**↑
- Aufbau von funktionierender Komplexität (Baum, Organismus, Ökosystem) erfordert Energie von außen ==> von innen heraus wird Entropie exportiert: **Nicht-Gleichgewicht** ==> **Entropie**↓

Mein 1. Kontakt mit Komplexität



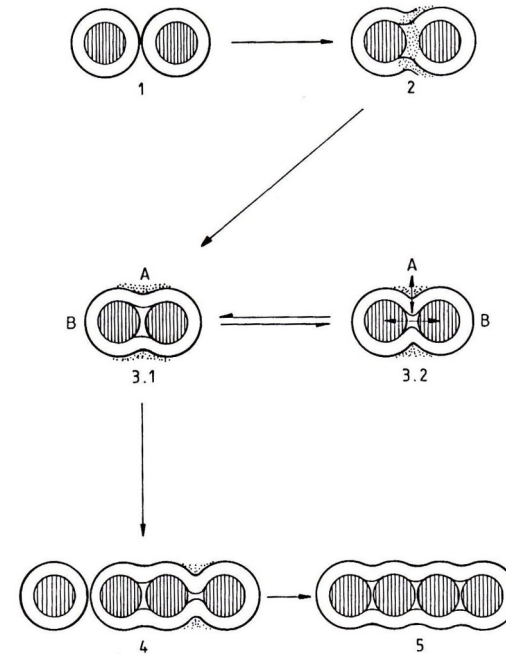
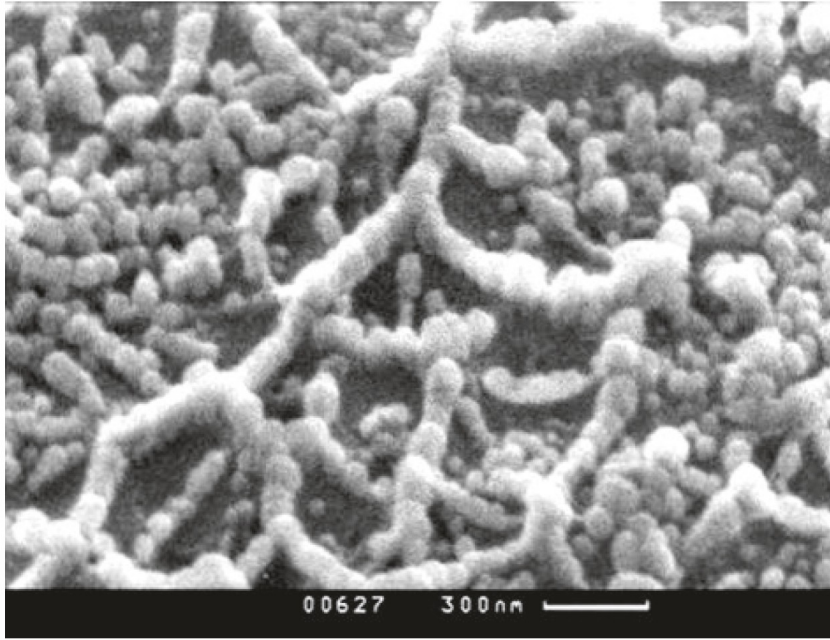
Anstelle der erwarteten Verteilung von dispergierten Teilchen (wie rechts gezeigt) entdeckte ich komplexe Strukturen, deren Entstehung komplett schleierhaft war; anstelle von ca 4 Vol.-%-Anteil an Teilchen war die Bruchfläche nahezu komplett voll.

Mein 1. Kontakt mit Komplexität



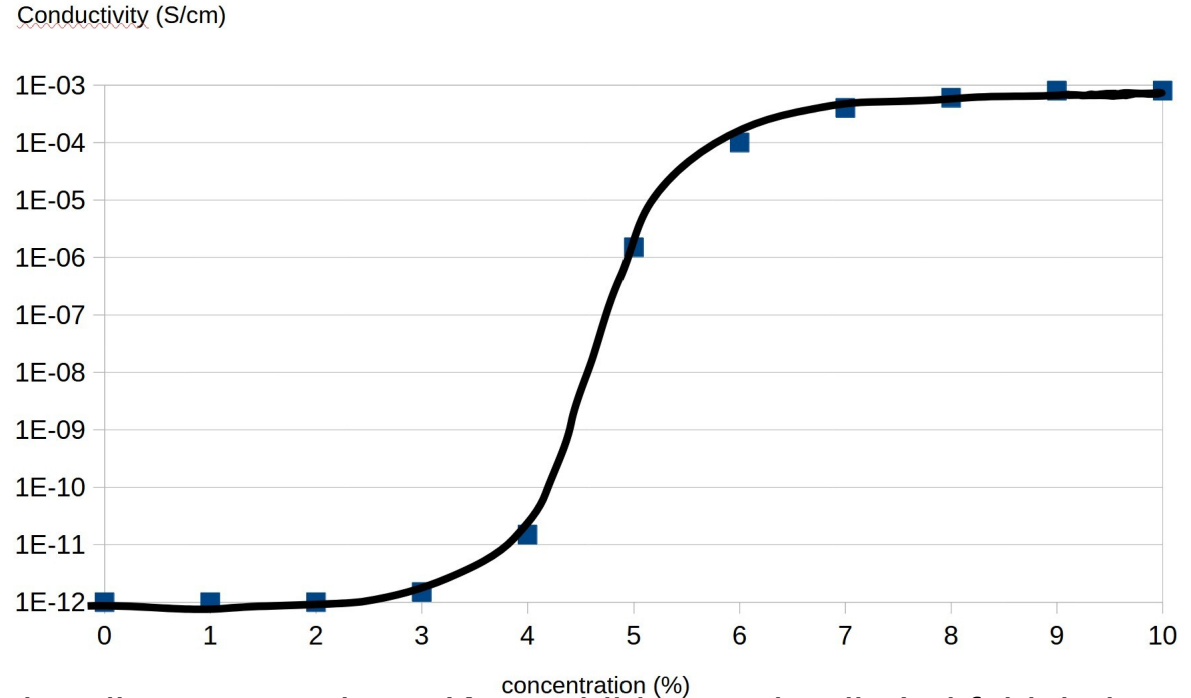
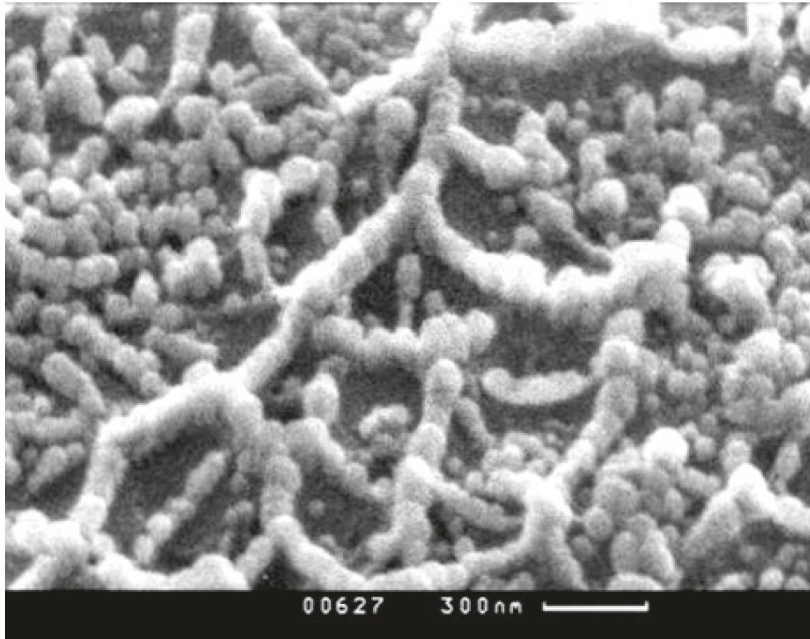
Es mußte also eine Phasentrennung gegeben haben in ein kontinuierliches 3D-Netzwerk einlagiger Schichten der dispergierten Phase in einer ebenso kontinuierlichen Phase des Mediums: ein interpenetrierendes Netzwerk 2er kontinuierlicher Phasen.

Mein 1. Kontakt mit Komplexität



Erst viel später gelang es auch, die zahlreichen experimentellen Beobachtungen mit einem Entstehungsmechanismus „Dispersion (mit Adsorption des Mediums)→ Flokkulation (mit teilweiser Desorption)“ zu erklären, noch viel später auch NGG-thermodynamisch-theoretisch: Entropie sinkt, überkritischer Energie-Input.

Mein 1. Kontakt mit Komplexität

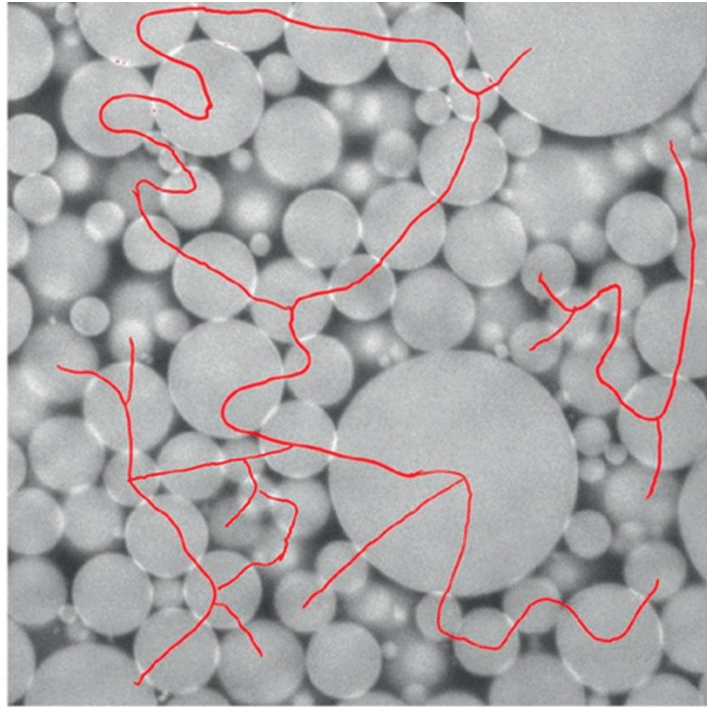


Sobald sich bei einer kritischen Konzentration diese verzweigten Ketten bilden, steigt die Leitfähigkeit der Dispersion um etwa 10 Zehnerpotenzen sprunghaft an. Das ist mit Gleichgewichts-Thermodynamik nicht erklärbar, nur mit Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik:

Prigogine's „dissipative Strukturen“ / Entropie-Export.

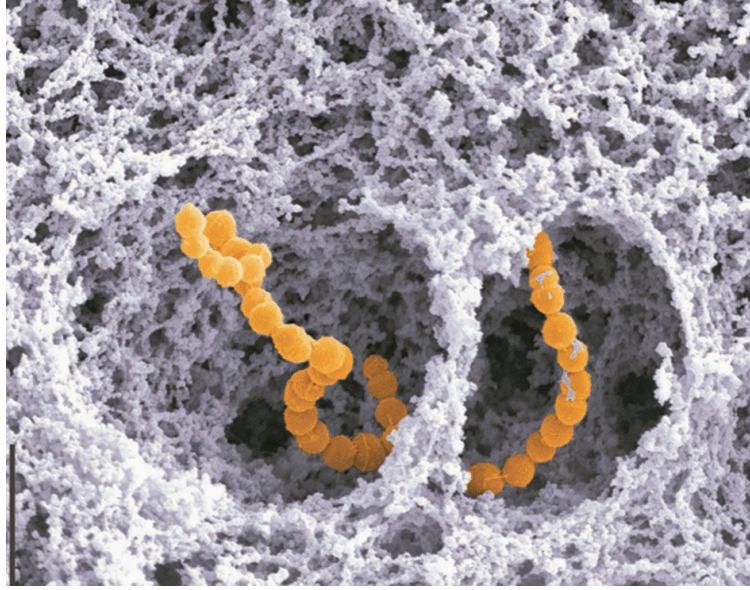
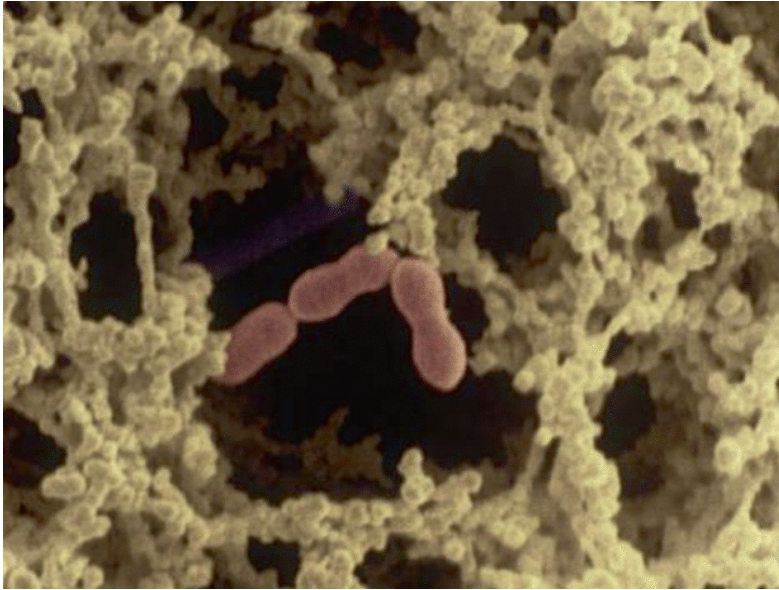
NGG-Theorie von Dispersionen und Emulsionen: B. Wessling, Z. Phys. Chem. 191, 119-135 (1995)

Beispiele für komplexe Strukturen: Mayonnaise

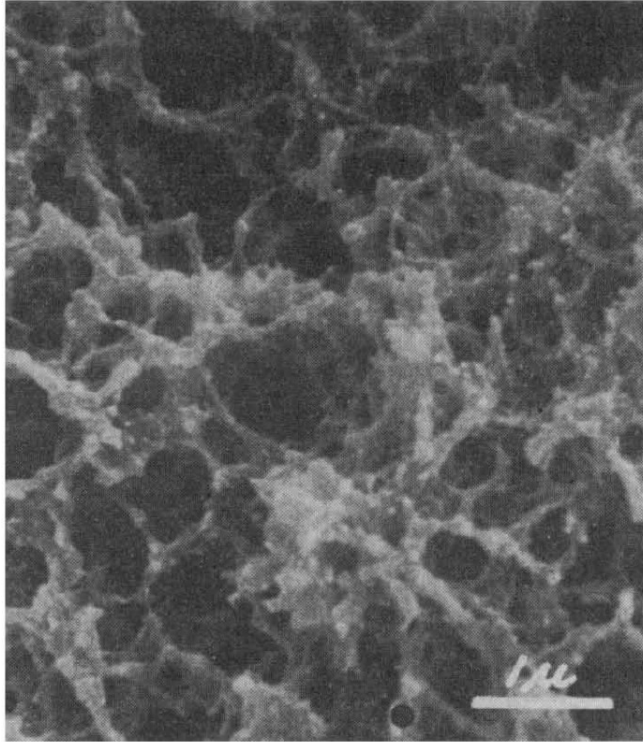


Überall, wo Dispersionen / Emulsionen erzeugt werden, haben wir solche komplexen Strukturen, die denen in meinen technischen Dispersionen ähneln.

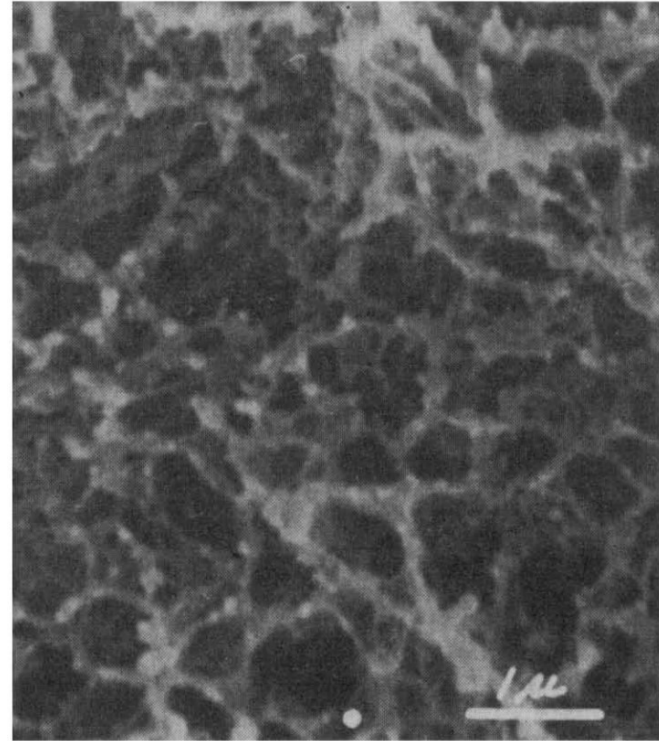
Joghurt



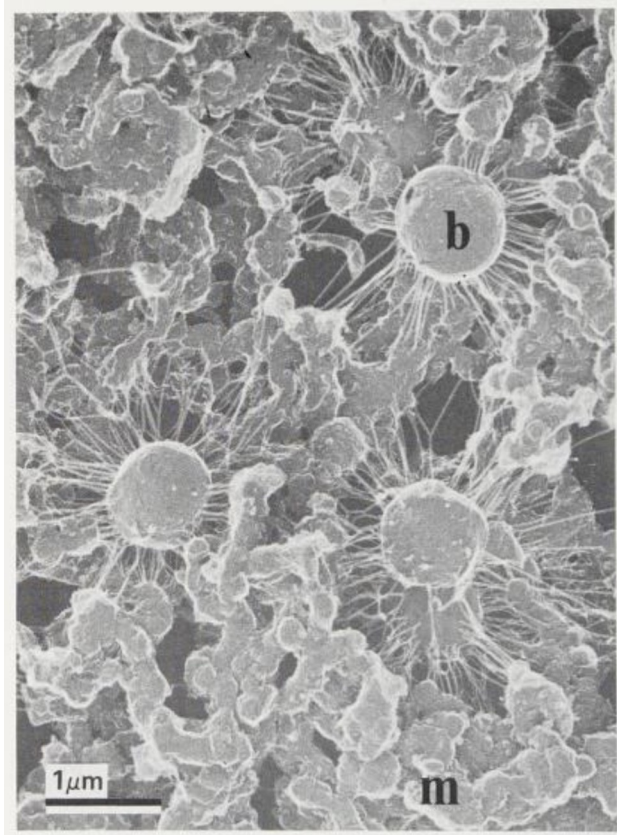
Tofu



gekochtes Ei



Cottage Cheese



Anhand des Energiebedarfs können wir einen Großteils des mit der Herstellung verbundenen Entropie-Exports berechnen.

In meinem neuen Buch sind die Berechnungen Dann bald zu finden.

Weitere Beispiele für offene Systeme ==> Komplexität

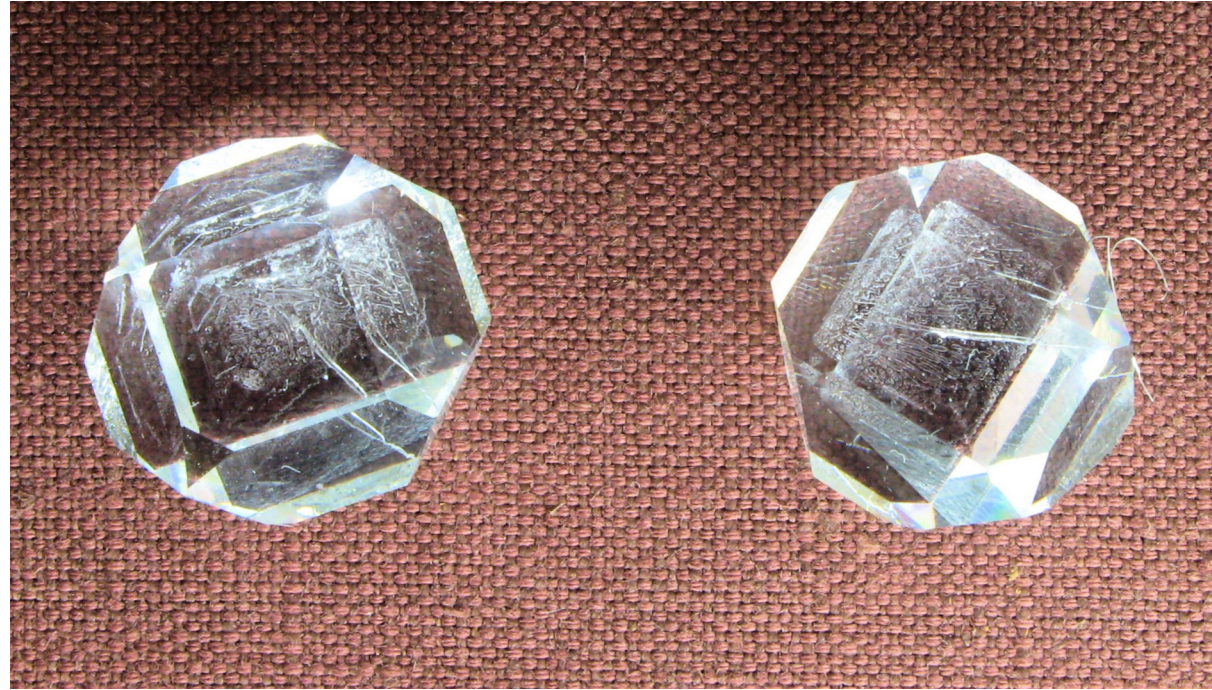
- 2 gleich alte Eichen im Winter:

das Muster der
Baumkronen ist
jeweils einzigartig,
ähnlich, nie identisch

- nicht-lineare Prozesse



Komplexität vs. Ordnung: Einkristall eindeutig beschreibbar

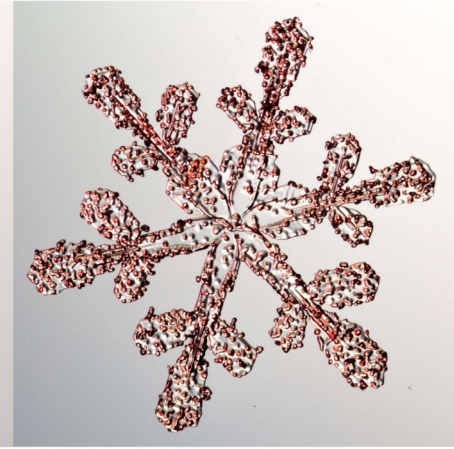
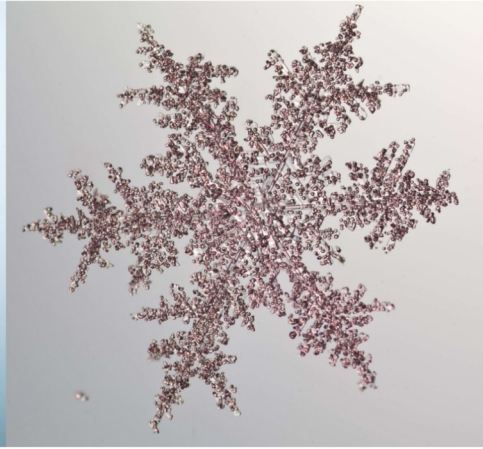


Eisblumen, nachts gebildet bei -15° ;
Komplexität, gebildet im Nicht-Gleichgewicht

Einkristalle
geordnet, gebildet im Gleichgewicht

Für komplexe Strukturen: kein Algorithmus, der die Unterschiedlichkeit beschreibt.

Keine 2 Schneeflocken sind identisch



**Komplexität weitab
vom Gleichgewicht**

Keine Schneeflocke
sieht exakt so aus wie
eine zweite; komplexe
Struktur mit

Entropie-Export
(Kristallisationswärme
→ in die Wolke)



Fotos: Mark Cassino,
lizenziert für das neue
Buch „Sustainability
Reexamined“

Relativ einfaches komplexes System

- Rayleigh-Bénard-Konvektion
- Diese Wabenzellen bilden sich spontan, wenn die Wärmezufuhr von unten einen kritischen Wert übersteigt.
==> Entropie-Export!



Komplexe zyklische Reaktion: BZ

- **Belousov-Zhabotinski**
- Entropieexport durch CO_2 und H_2O als Endprodukte der Gesamtreaktion
- 18 Teilreaktionen in 3 Reaktionsgruppen, Simulation: nicht-lineare gekoppelte Gleichungen
- Niemals exakt das gleiche Muster!

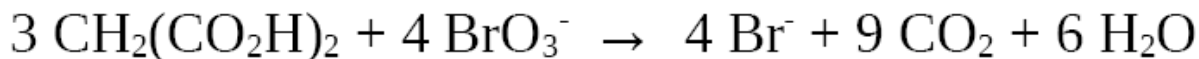
Video auf Flickr bzw youtube:
Von Michael Rogers



Entropieberechnung der BZ



Wieviel Entropie wird exportiert?



$$\begin{aligned} & -3 \cdot 130 & - 4 \cdot 150 & \rightarrow & 4 \cdot 96 + 9 \cdot 214 + 6 \cdot 70 \\ = & -990 & & \rightarrow & 2730 \\ = & 1740 \text{ [J/(mol} \cdot \text{K)]}^{33} \end{aligned}$$

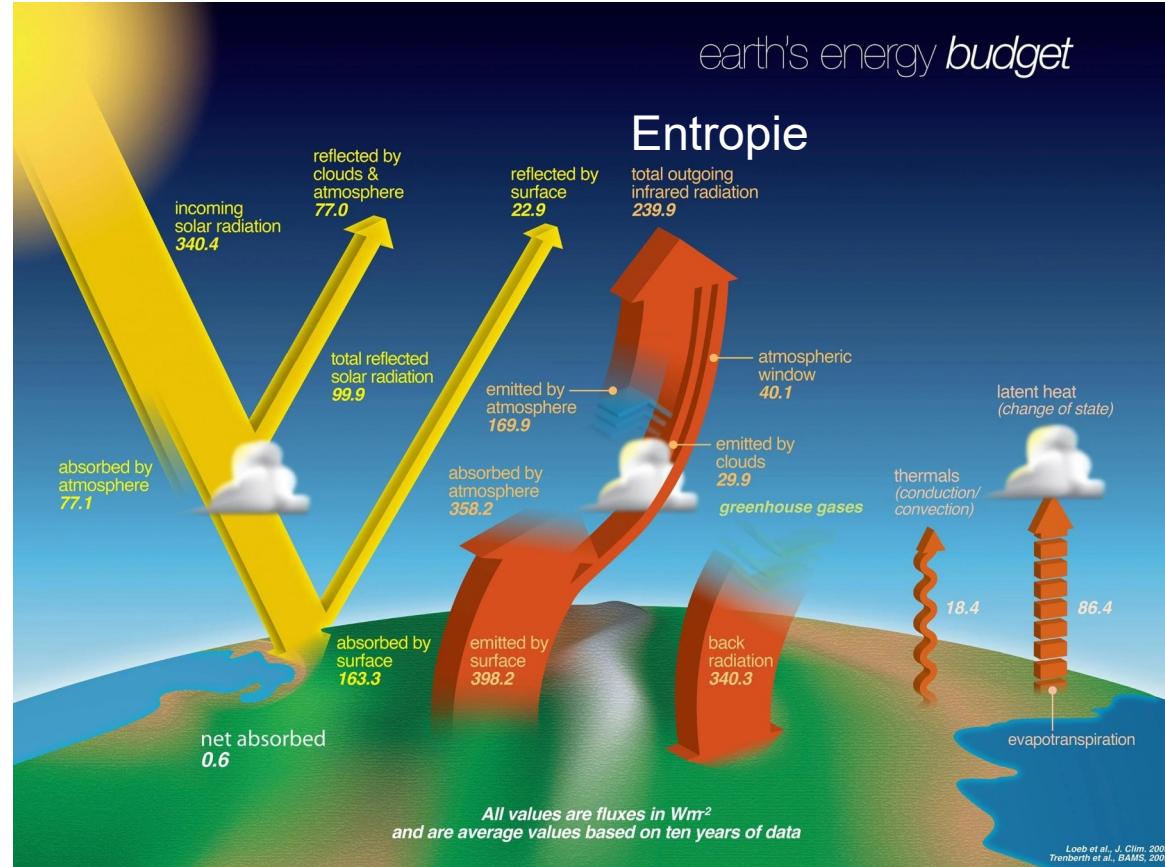
(vereinfachte Rechnung, Solvatationsentropie außer Acht gelassen)

³³ sources for the standard entropy values used:

- malonic acid: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C813569&Mask=2>
- KBrO₃: <https://unpa.edu.mx/~aramirez/tabla%20de%20propiedades%20termodinamicas.pdf>
- KBr <https://www.mrbigler.com/misc/energy-of-formation.PDF>
- CO₂ [https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Carbon dioxide %28data page%29.html](https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Carbon%20dioxide%20data%20page%29.html)
- H₂O <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Mask=2>

Selbstverständliche Grundlagen: Wovon leben wir?

- von der Sonne (auch von sehr viel früher „gestorbenen“ Sonnen, die die schwereren Elemente, schwerer als Wasserstoff & Helium erzeugt hatten); Erde: offenes System
- Vorab: es gibt keinen einzigen mit Energie- / Materie-Umsatz verbundenen Vorgang auf der Welt, bei dem nicht Entropie entsteht; im gesamten Universum nicht.
- *Natürlicherweise* strahlt die Erde so viel Entropie in Form von langwelligem Infrarot ab, wie als hochwertige Solarenergie eingestrahlt wird.

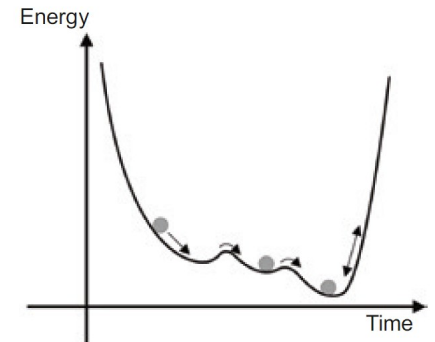
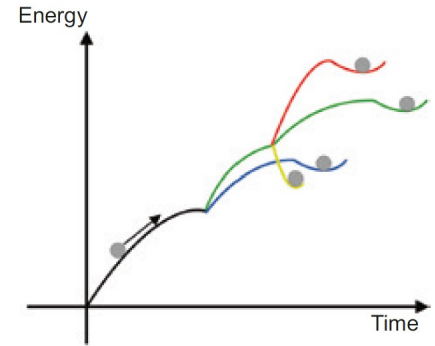


Komplexität und Entropie

- „Entropie steigt immer an“ (2. Hauptsatz der Thermodynamik) gilt nur in geschlossenen, isolierten Systemen (auf dem Weg zum GG) und im Maßstab des Universums; in offenen Systemen kann Entropie sinken: ==> aus NGG-Systemen (fern vom GG) heraus wird Entropie exportiert
- komplexe **Nicht-Gleichgewichts**-Systeme: Leben (Ökosysteme, Pflanzen, Tiere, Artenvielfalt, wir Menschen; auch die Wirtschaft)
- **Komplexität** entspricht Minimum an Entropie; Entropieexport wurde erzwungen durch überkritischen Energie-Import;
- **ACHTUNG:** umgekehrt entspricht einem Verlust an funktionierender Komplexität ein Anstieg der Entropie: Verlust von Ökosystemen, Artenvielfalt; „Schäden“ entsprechen Entropie-Anstieg.

Verlust an funktionierender Komplexität = Entropieanstieg

- Wenn in einem System Entropie erniedrigt werden soll, muß überkritisch viel Energie von außen hineinfließen ==> Entropieexport, Aufbau von Komplexität (Ökosysteme, Gesellschaft, Wirtschaft)
- Umgekehrt: Wenn funktionierende Komplexität verloren geht ==> Entropieanstieg, Energie des Systems strebt dem Minimum entgegen



Entropie: Kriterium für Nachhaltigkeit

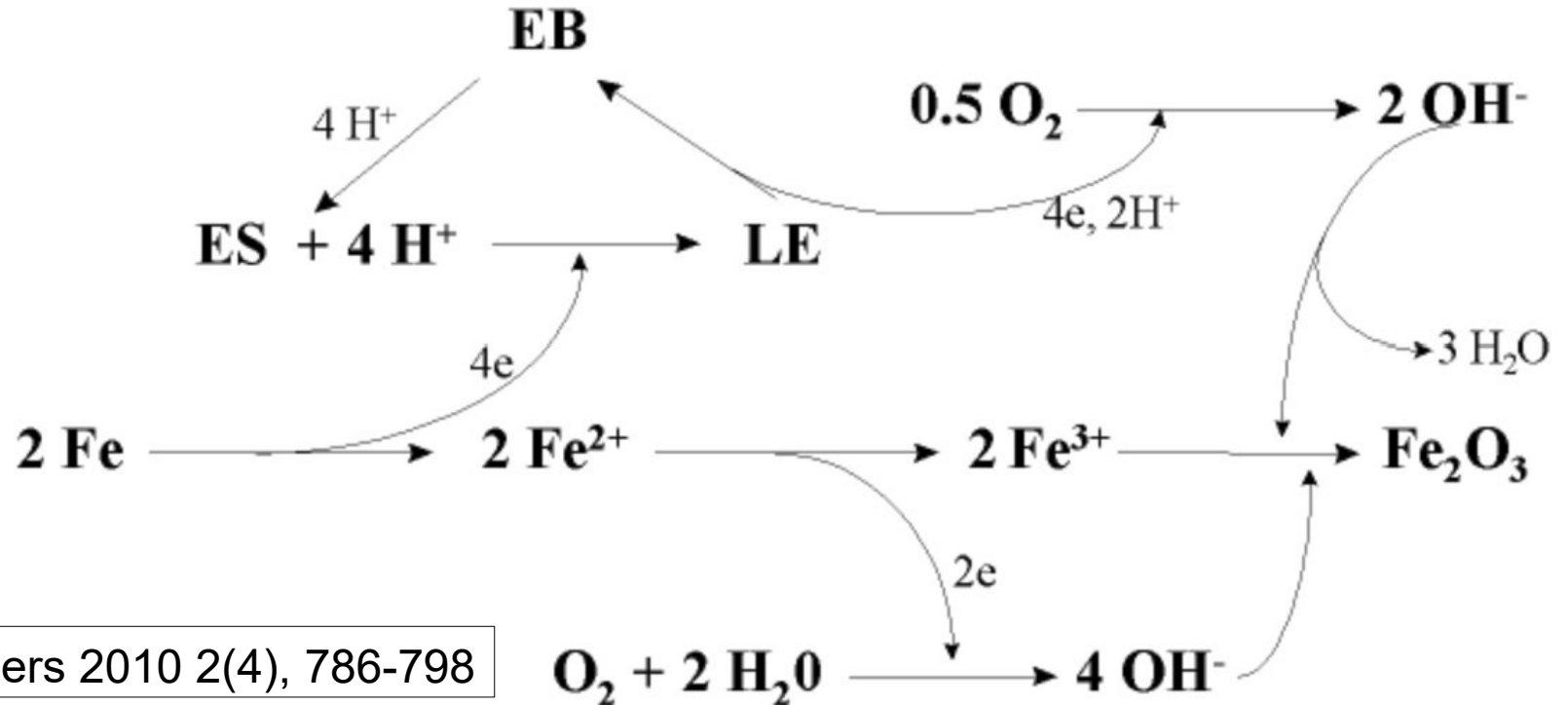
- Entropie ist Maß für minderwertige (nicht bzw. nur sehr aufwendig nutzbare) Energie und Materie,
- somit auch ein Maß für Verbrauch / Verlust an Umweltgütern (Primärenergie, Rohstoffe) und an funktionierender Komplexität (Ökosysteme)
- ebenso ein Maß für Verschmutzung (Mischungs- bzw. Lösungsentropie): Böden, Flüsse, Meere.
- Nachhaltigkeit: Produkt/Verfahren A ist weniger nicht-nachhaltig als Alternativen B, C, D ..., wenn es weniger Entropieproduktion verursacht
- Wenn Entropie zu schwer auszurechnen ist, nehme man MIPS als Indikator für Entropie.

Anwendung: Korrosion (1)

- Weltweiter Durchschnitt: jährlicher Verlust wegen Korrosion: 3.4% des BIP, 2.5 Trillion USD Kosten
- Zum Ersatz von korrodierten Fe-Produkten müssen ww ca. 60 Mio t Rohstahl (= 3% der jährlichen Stahlerzeugung) produziert werden.
- Entropieproduktion dabei (wg Energiebedarf von 20 GJ/t Rohstahl): 68.22 MJ/K
→ Entropie: ca $4,1 \cdot 10^{15}$ J/K (PJ/K) für 60 Mio t
- Entropieproduktion der Korrosions-Reaktion (vereinfacht)
 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$: 145 GJ/K (10^9 J) – vernachlässigbar
- nicht vernachlässigbar: Mischungsentropie wird sehr hoch sein – es werden feinste Teilchen von $358 \cdot 10^9$ Mol Fe_3O_4 auf der Erde verteilt, unklar aber, welchen Verdünnungszustand man annehmen soll für Teilchen welcher Größe
- MIPS: 900 mio t abiotisch (Gestein, Erde) + mehrere Dutzend Mrd m^3 Wasser

Anwendung: Korrosion (2)

Organisches Metall Polyanilin*:
edler als Fe, wirkt als Katalysator

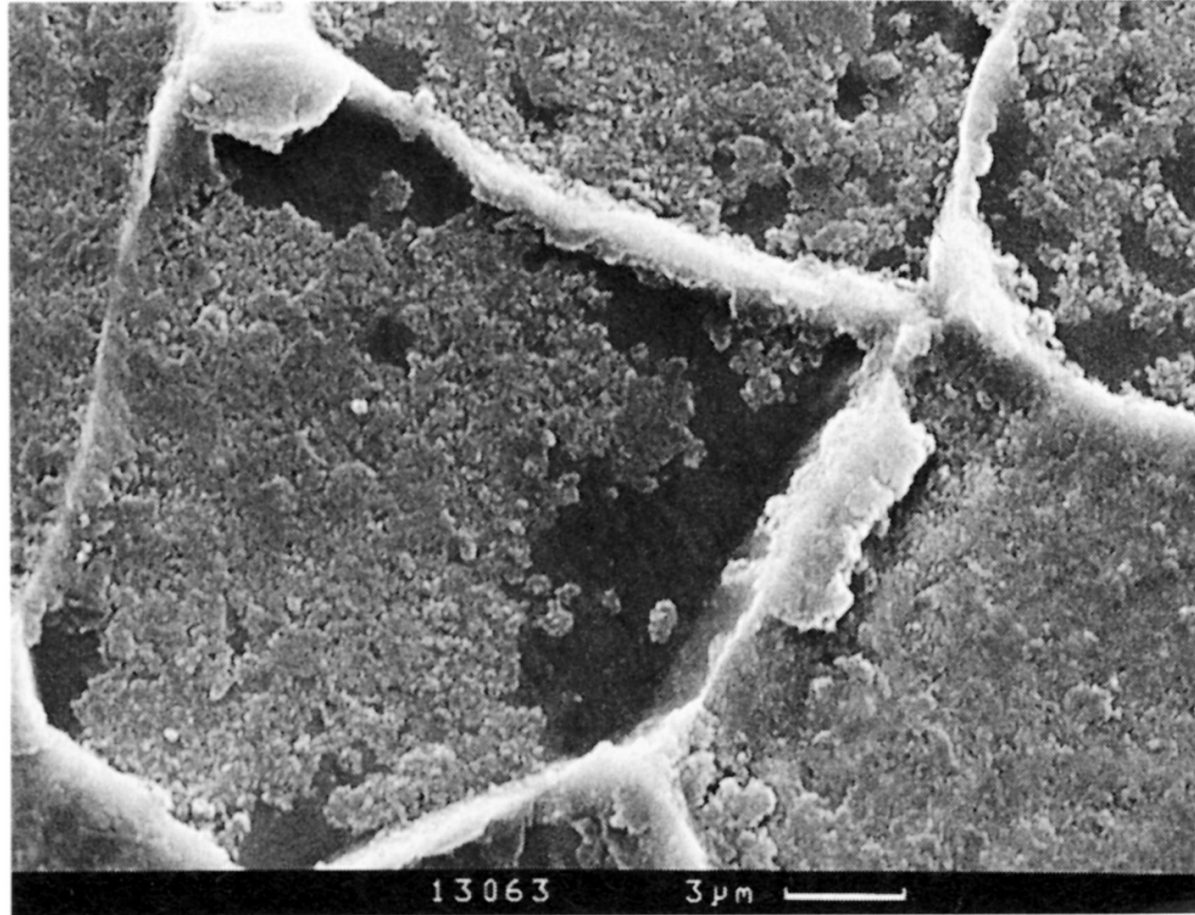


*B. Wessling, Polymers 2010 2(4), 786-798

Anwendung: Korrosion (3)

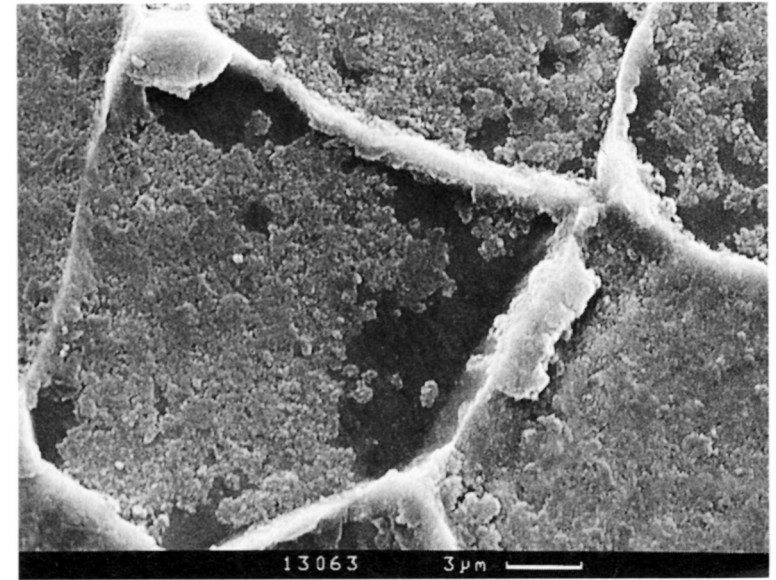
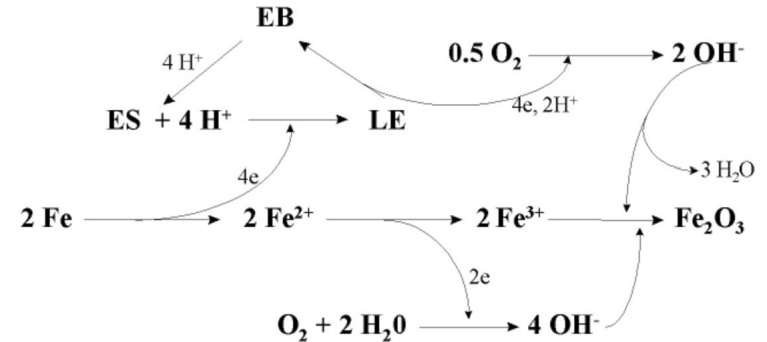
Passivierung $\rightarrow$ Fe_2O_3

10fach verlängerte
Lebensdauer



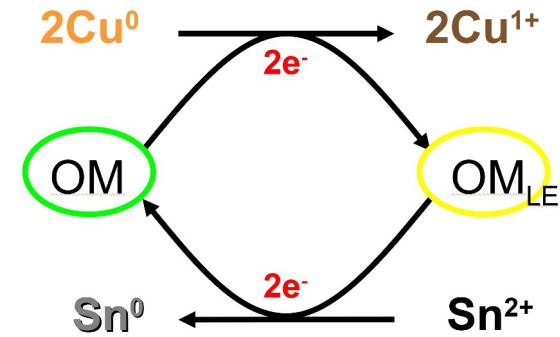
Anwendung: Korrosion (4)

- Entropie -90%: 0,4 PJ/K
- MIPS -90%: 90 Mio t abiotisch
- Kosten -90%: 250 Mrd USD

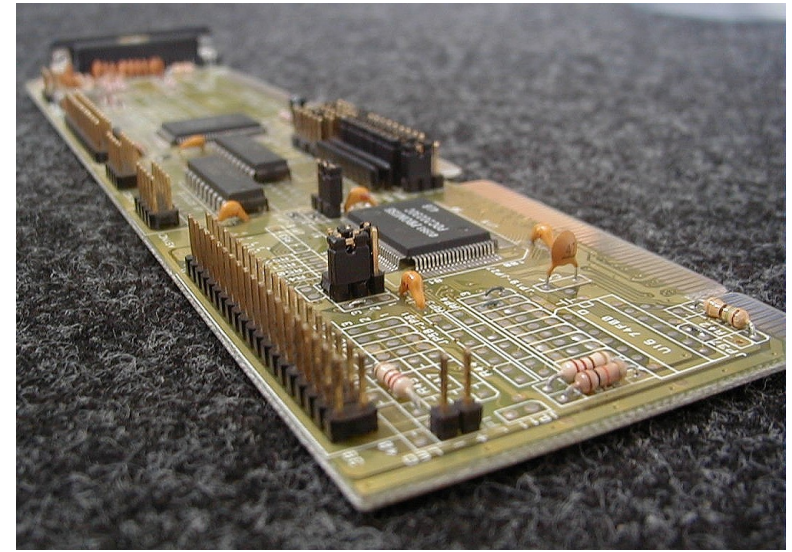


Anwendung: Leiterplatten

Organisches Metall: auch edler als Cu



OM-katalysierte Zinnabscheidung: OMCSN
25 bis 45 m lange, komplexe Anlagen

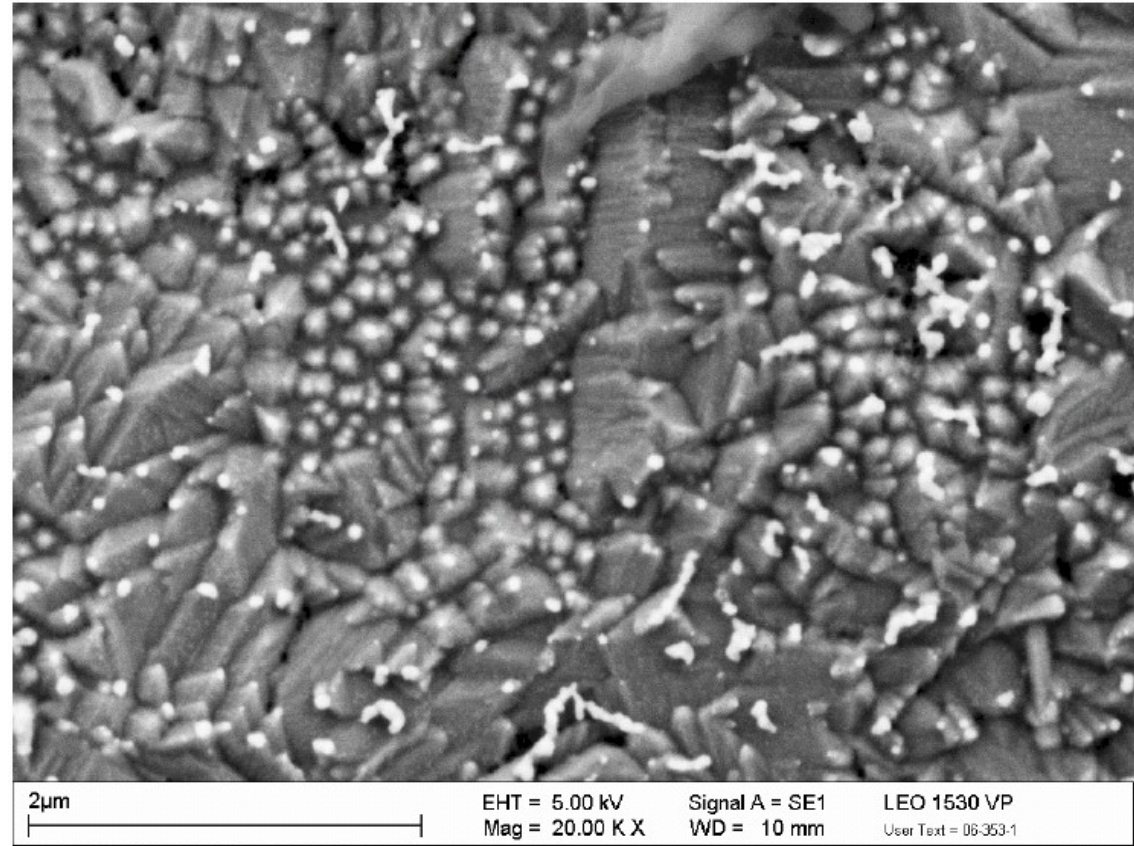


Anwendung: Leiterplatten (MIPS)

- ENIG: 6 μm Ni + 0,15 μm Au; OMCSN: 1 μm Sn
- MIPS:
 - Ni - 141 $\text{g}_{\text{Gestein}}/\text{g}$; 233 $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}$, gesamt 374 $\text{g}_{\text{MI}}/\text{g}_{\text{Ni}}$
 - Au - total 540.000 $\text{g}_{\text{MI}}/\text{g}_{\text{Au}}$
 - Sn - 8,5 ; 10,9, gesamt 19,4 $\text{g}_{\text{MI}}/\text{g}_{\text{Sn}}$
- pro m^2 Cu-Oberfläche
 - ENIG: 1,6 $\text{t}_{\text{MI}}/\text{m}^2_{\text{Cu}}$**
 - OMCSN: 0,142 $\text{t}_{\text{MI}}/\text{m}^2_{\text{Cu}}$: 8,9% der Umweltbelastung von ENIG – ersetzt 2 Mio m^2/a ENIG! (= 20 Mio m^2/a PCB)**

Anwendung auf Leiterplatten: Nanofinish

- nur 50 nm nominelle Schichtdicke
- MIPS total: $12 \text{ g}_{\text{MI}}/\text{g}_{\text{NF}}$
- $327 \text{ g}_{\text{MI}}$ per 1 m^2 Cu mit Nanofinish
- 0,02% von ENIG,
0,23% von OMCSN



*B. Wessling et al., Nanoscale Res. Lett. 2007 (2)

Anwendung: Recycling

- Überall wird ständig das Loblied des Recyclings gesungen. Utopie „circular economy“ ist für viele ultimates Ziel.
- Prof. Anders Levermann (PIK) proklamiert in seinem Buch „Die Faltung der Welt“ (Ullstein 2023)
 - a) „unendliches Wachstum in einer endlichen Welt“, analog zu Vögeln, die unendliche Optionen für Flugwege haben, trotz der Begrenzung am Boden und oberhalb von etwa 8.000 m
 - b) „Faltungsgrenzen“, mit denen das erreicht werden kann.
- Eine dieser Faltungsgrenzen ist (stufenweise einzuführen): „keinerlei Abbau von Rohstoffen mehr“ und somit „100% Recycling“, und das „in automatischen Recyclingfabriken“, die zu 100% mit regenerativer Energie betrieben werden, „immer dann, wenn es Überschuß an solcher Energie gibt“.
- 100% Recycling mit Null Rohstoffgewinnung erfordert definitiv unendlich viel Energie. Warum?
- Abrieb, Feinstaub, Korrosion, umwelt- / wetterbedingte Alterung, Verfall von Gebäuden, wenn nicht gepflegt, repariert, saniert wird; Reparatur erfordert Werkzeuge, die abgenutzt werden; jeglicher Abrieb, Feinstaub, Korrosionsprodukte verteilen sich in der Umwelt ==> Mischungs-Entropie steigt ==> definitiv unmöglich, sie einzusammeln, zu trennen, aufzubereiten, es sei denn mit unendlich viel Energie.
- „100% Recycling mit Null Rohstoffgewinnung“ ist nicht Utopie, sondern die Illusion eines Perpetuum Mobile: Prof. Levermann ignoriert die Entropie.
- Reparatur, Recycling ist sehr sinnvoll, solange damit nicht mehr Entropie erzeugt wird als durch neues Produkt.

Anwendung: Fe-basierte „Kreislauf-Energiewirtschaft“

- Zielsetzung: Solarstrom aus der Sahara chemisch speichern und bei uns nutzen
- Prinzip: Eisen in umgerüsteten Kohlekraftwerken zu Eisenoxid verbrennen:
$$3 \text{ Fe} + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$$

und in der Sahara mit dort aus Solarenergie erzeugtem Wasserstoff zurück zu Eisen-Pulver reduzieren:
$$4 \text{ H}_2 + \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 4 \text{ H}_2\text{O} + 3 \text{ Fe}.$$
- Meine Berechnung zeigt: aus 2.500 kWh Sahara-Solarstrom macht man 700 kWh Strom, Verlust: 1.800 kWh.
- Dieser Verlust entspricht 22 MJ/K an Entropie = Verlust von Umweltgütern; zusätzlich 7 MJ/K aufgrund von notwendigem Ersatz von Fe-Verlust (10% pro Zyklus).
Umweltkosten für 700 kWh Strom: 29 MJ/K an Entropie
- Jede Tonne Fe im Kreislauf erhöht Entropie um 29 MJ/K, anstatt Direktnutzung, Speicherung des Stroms → 90% Wirkungsgrad; **Direktnutzung: ca 26 MJ/K geringere Entropie“kosten“**
- Das gilt im Prinzip genauso für CCU, e-fuels, SAF (Wirkungsgrad max. 10% ==> 90% Verlust)

Energie-/Entropiebilanz von DAC (1)

- Politik, Medien und Fachpublikationen: CO₂ soll aus der Atmosphäre (oder aus Abluft) herausgeholt & in der Tiefe endgelagert werden („DAC“ bzw. „CCS“)
- Ist das nachhaltig? (= keine schwerwiegenden Kollateralschäden?)
==> Energie- und Entropiebilanz pro Tonne CO₂ untersuchen!
- **CO₂-Bildungsenthalpie:** -8,9 GJ, nur ca. 3 GJ davon zuvor energetisch genutzt (Wirkungsgradverlust = **Entropie**); zusätzlich **Mischungsentropie** ↑ (in der Luft); wenn wir CO₂ wieder herausholen ==> **Mischungsentropie** ↓
dafür erforderlich: **Energie für Absorption+Endlagerung:** ca 9 GJ (Mittelwert Literatur + Wirkungsgradverlust für elektr. Teilbetrag), 7 GJ sind direkt schon Entropie
==> das Dreifache der Energiemenge,
die wir bei der Bildung von 1 Tonne CO₂ nutzen konnten!
- **gewaltiger Entropieanstieg!**

Mischungsentropie

- Wenn ein Stoff in einem Medium gelöst wird, Zucker in Wasser oder CO_2 in der Atmosphäre, steigt die Entropie an, weil sich das System von allein in Richtung Gleichgewicht bewegt.
- Berechnung der Mischungsentropie:

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

Energie-/Entropiebilanz von DAC (2)

- Entropiebetrachtung:

Ergebnis: **4,15 MJ/K** Entropie pro Tonne CO₂ + mind. 0,8 t Wasser werden an Entropie in der Atmosphäre vermindert = Maßzahl für positiven Effekt (aus Mischungsentropie) - Entropienutzen

- **ABER!** Extrem hoher Energieaufwand erforderlich / Wirkungsgrad!
- Denn: aus 16 GJ Primärenergiebedarf für 9 GJ Wärme+Strom pro Tonne CO₂ entstehen (≈ 7 GJ Energieverlust) ca **23 MJ/K Entropie** = **6mal mehr Entropie, als in der Luft an Entropie erniedrigt** (gerechnet mit 300 K)

==> es entsteht 6mal mehr Entropieschaden in der Umwelt als Entropienutzen in der Atmosphäre

- Neue Studie: effektiver CO₂-Abscheidungs-Wirkungsgrad ca 50%! doppelter Energiebedarf, halber Entropienutzen – mindestens 12facher Entropieschaden.
- ==> **DAC (und CCS) alles andere als nachhaltig**
- **CCU noch schlimmer, noch mehr nicht-nachhaltig: a) vorab DAC, dann b) Wasserstoff-Erzeugung (siehe Eisen-Energiezyklus) → gewaltige Energieverschwendung + Küsten Gewässerverschmutzung durch Wasserentsalzung (direkte Nutzung des Stroms 10mal effizienter)**

Andere Geoengineering-Pläne

- **SO₂ in die Stratosphäre blasen** (Vulkane nachahmen):
 - 5 (bis 20) Mio t pro Jahr → >900 Flüge pro Tag (!)
 - bisher gibt es genau 1 Flugzeug (<2 t Beladung): ER-2, NASA
 - Entwicklung von Flugzeugen: 15 t Beladung;
 - Energiebedarf >77 GJ pro Flug (gesamt 65 PJ), → 17 Mio t CO₂
 - Risiken, v.a.: was passiert, wenn man damit aufhört?
- **Makroalgen-Farmen im Ozean:** 5 große subtropische Wirbel (nährstoffarm); dort sollen 40 Gt CO₂ pro Jahr eingefangen werden;
 - riesige Pumpen sollen Wasser/Nährstoffe aus 1.000 m hochholen
 - man braucht ~4.5 Mio km² für 180 Gt Sargassum-Algen, wenn alle 2...3 Wochen geerntet wird (monatlich 15 Gt) → massive Sauerstoffverarmung (GEOMAR)
 - und dann? An die Küsten bringen, und dort was?
 - „als Rohstoffe nutzen“: Energiebedarf für Trocknung gigantisch (170 Gt Wasser verdampfen): ca 400 EJ (Weltenergiebedarf z. Zt. 620 EJ)
- **Basalt vermahlen, verwittern lassen, auf Äcker streuen:**
 - erfordert 6 t Basaltmehl für 1 t CO₂, CDR Terra-Projekt: 60 Mio t CO₂ pro Jahr in D
 - das wären 360 Mio t Basalt in D abzubauen! 1 Mio t pro Tag!
- Mit etwas Aufwand läßt sich die Entropieproduktion berechnen, Ergebnis fraglos sehr negativ

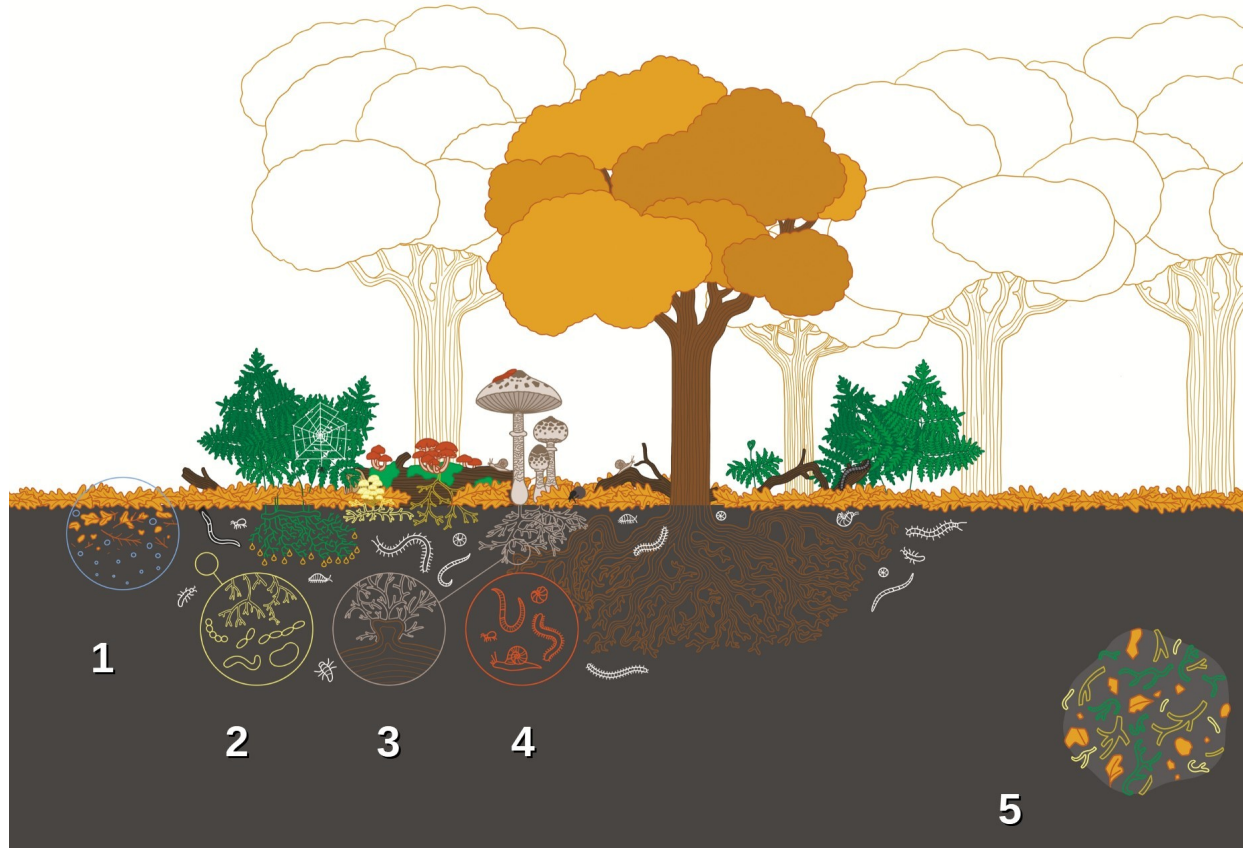
Konsequenz daraus

- Wo bleibt die Entropie z. B. von **DAC** ($>25 \text{ MJ/K, } t_{\text{CO}_2}$), oder **Fe-Energie-Kreislaufwirtschaft** ($29 \text{ MJ/K, } t_{\text{Fe}}$) was macht diese Entropiemenge? (die nicht abgestrahlt werden kann): sie sammelt sich in vielfältiger Form als Umweltschaden (bzw. Verlust von Umweltgütern) auf der Erde an. Dabei wurde noch nicht einmal der Rohstoff- und Infrastruktur-/Landschaftsbedarf einberechnet!
- Beachten: Entropie-Anstieg = Verlust an Nutzbarkeit, an Funktionalität komplexer Systeme, Stoffe; Beispiel: Boden, Ökosysteme, Artenvielfalt, Rohstoffe. Damit beuten wir das Kapital der Erde aus.
- ==> massive Kollateralschäden aller Art durch Geoengineering in verschiedenen Sektoren der Umwelt
- „Der Klimawandel entscheidet darüber, WIE wir leben, der Artenschwund entscheidet darüber, OB wir leben.“ (Zitat Prof. Dr. Katrin Böhning-Gaese, wissenschaftl Geschäftsführerin Helmholtz UFZ Leipzig, Professur an Univ. Leipzig)

Nachhaltige Alternative: die Natur

- **Wir müssen den Klimawandel ZUGLEICH mit dem Artenschwund bekämpfen, und dies GLEICHZEITIG und mit den GLEICHEN Mitteln: Moore, Mischwald, u.a., und auch (Bio)-Landwirtschaft**
- Die natürlichen Prozesse, die einerseits lebenswichtige Artenvielfalt bereitstellen und nebenher unsere Lebensmittel, speichern zugleich massiv CO₂ in den Böden ein.
- Die dabei entstehende Entropie wird von der Erde abgestrahlt, während die Entropie unserer zivilisatorischen Prozesse weitgehend auf der Erde verbleiben (Abfallberge, Landschaftszerstörung)

CO₂-Speicherung im Boden



1) Blätter, Pflanzenreste zerfallen, Regen + Käfer, Schnecken, Regenwürmer transportieren sie in den Boden

2) Mikroorganismen ernähren sich davon ==> zersetzen diese Pflanzenreste

3) Mykorrhizae verfrachten die entstandenen C-Verbindungen als Nährstoffe zu anderen Pflanzen

4) andere Bodenlebewesen fressen und verdauen Pflanzenreste ==> Kot

5) a) schwer/nicht abbaubare Gerbstoffe/Lignine verbleiben im Boden
b) leichter abbaubare Stoffe bilden Aggregate ==> schwer abbaubar
c) Komplexe mit Tonen werden gebildet ==> Speicherung im Boden über Jahrtausende hinweg

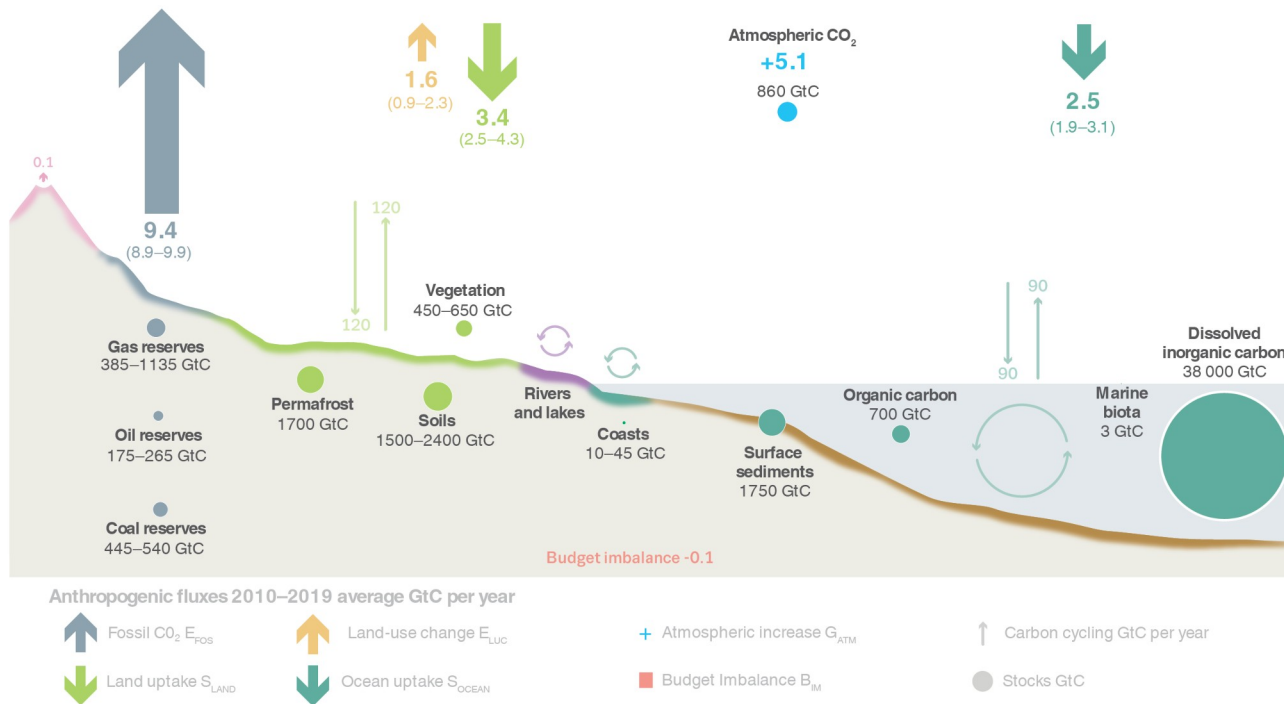
Sind Kühe „Klimakiller“? (1)

In Permafrostböden (1.700 Gt) und in sonstigen (bewachsenen) Böden (bis 2.400 Gt) sind gigantische Mengen an C gespeichert.

Wie kommen die da hin?

Es gab doch schon immer Aber-Millionen von Wiederkäuern!

The global carbon cycle



Sind Kühe „Klimakiller“? (2)

1 Kuh (Rind) 600 kg Gewicht
legt 11 Tonnen/Jahr Kuhfladen
auf die Weide → 120 kg
Insektenlarven

Gründünger und Kuhdung,
Schweinedung

CO₂-Speicherung im
Ackerboden (ca 7 t/ha, Jahr,
wenn biologisch)

mehr noch in den Böden der
Weiden (12 t/ha, Jahr)



Kattendorfer Hof

www.kattendorfer-hof.de



450 Hektar Pachtland (320 ha Ackerland inkl ca 12 ha für Gemüseanbau, 130 ha Weiden u. Heuwiesen)

Direktvermarktung: 7 eigene Hofläden, 1 Marktstand, solidarische Landwirtschaft, nur Brotgetreide wird nicht direkt vermarktet (→ großer Biobäcker)



65 Milchkühe (inkl Ammen), zusätzlich 150 Kälber, Färsen, Rinder **(Methan-Emission!)**; - eigene Käserei (Käse, Joghurt, Quark, Butter); (Roh-)Milchverkauf

(Energiebedarf! 100 kW PV-Anlage, Holzvergaser aus 12,5 km Knickpflege)

gut 100 Schweine (die selten gewordene Angler-Sattelschwein-Rasse), die schlabbern gern die Molke und fressen Gemüseabfall und unbrauchbar gewordene Kartoffeln

Fütterung ausschließlich mit selbst angebautem Futter aus der 6-jährigen Fruchtfolge
==> starker Humusaufbau

CO₂-Bilanz

Jährliche CO ₂ -Emissionen / Bilanz aus Fixierung und Speicherung	min/max t CO _{2(eq)}	Anmerkungen
Emissionen	(460)	Gesamt
CO _{2eq} (Methan)	269	155 Kühe/Rinder mit 54 kg CH ₄ /Jahr, 50 Kälber mit 25 kg CH ₄ /Jahr
Fossiles Gas (Restbedarf ⁵) und Strom (Restbedarf)	45	Mit 0,2 kg CO ₂ für fossiles Gas/kWh, 0,363 kg CO ₂ für externen Strom/deutscher Mix (2024) ⁶
Diesel (Traktoren, Mähdrescher und LKWs für die Logistik)	146	Insgesamt ca. 55.000 Liter Diesel mit 2,65 kg CO ₂ pro Liter
CO₂-Bindung/Speicherung im Boden	(1393/3864)	Gesamt
Weiden	870/1560	6,7/12 t CO ₂ pro Hektar
Ackerflächen	523/2304	60 % des Potenzials der Weiden
Ergebnis	933/3404	Netto-Gesamt-CO_{2(eq)}-Bindung/Speicherung im Boden, Emissionen subtrahiert

*entspricht einer Einsparung von 6.617 MWh (bei Erfassung durch DAC) (mindestens $7 \cdot 10^6$ kJ pro Tonne durch DAC erfasste CO₂ = 1,944 MWh/t CO₂ und mit 1 kJ = 0,000277 kWh). Der Betrieb selbst verbraucht 160 MWh (PV und aus dem Netz) + 540 MWh (Diesel) + 80 MWh fossiles Gas und Holz aus Hecken = 780 MWh (11 % Einsparungen), was zu Nettoeinsparungen von über 5.000 MWh Energie führt und einer geschätzten Primärenergiemenge von 14 GWh bzw. 50.000 GJ entspricht.

Hamburger Zukunftsentscheid (1)

- keinerlei Bezug zu Artenschwund, nur „Klima“ -

Per Volksentscheid hat die Hamburger Bevölkerung am 12. 10. 2025 ein Gesetz geändert, wonach „Klimaneutralität“ von ursprünglich 2025 auf 2040 vorgezogen werden soll.

Nirgendwo im Forderungskatalog der Initiatoren und Unterstützer, nirgendwo im Gesetzentwurf oder in der Diskussion dazu geeigneter Maßnahmen (z.B. Studie des Ökoinstituts) wurden Ökosysteme, die CO₂ speichern können, erwähnt, und auch nicht die mindestens genauso schwerwiegende Krise der Biodiversität.

Hamburg benötigt rechnerisch zur Ernährung der Bevölkerung 810.000 ha Land, das sind (wiederum rein rechnerisch) 21% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Hamburg, Schleswig-Holstein und Niedersachsen (insgesamt 38.476 km² = 3.847.600 ha).

- weit über 90% der Nahrungsmittel sind nicht-bio ==> CO₂-Emissionen! Pestizide!

Hamburger Zukunftsentscheid (2)

- Vorschläge zur Behebung der Defizite* -

Das Freiburger Ökoinstitut hat (zusammen mit dem Hamburg Institut) in einer Studie Vorschläge dazu gemacht, wie die Klimaneutralität von 2045 auf 2040 vorgezogen werden kann.

- Darunter war CCS, das 100.000e von Tonnen an Restemissionen auffangen und abspeichern sollte – soll das CCS-CO₂ unter Hamburger Gebiet in die Erde gepreßt werden? Ganz bestimmt nicht! Es wird per Pipelines / Schiff nach Norwegen transportiert!

Nur 20.000 ha wiedervernäßte Moore (= 3,6% der Moorflächen in HH, SH, NS) können die Restemissionen aus Verkehr auffangen und abspeichern.

Nur 135.000 ha landw Nutzfläche, echt organisch bewirtschaftet, (= 3.5% der Landwirtschaft HH, SH, NS) reichen aus, um die erwarteten Restemissionen aus der Abfallwirtschaft abzuspeichern.

* siehe https://www.bernhard-wessling.com/hh-zukunftsentscheid_luecken, und Quellennachweise dort

Zusammenfassung

- Komplexität, die uns geschaffen hat und unsere Lebensgrundlage ist, entsteht NUR im thermodynamischen Nicht-Gleichgewicht durch Entropieexport. Auf dem Weg zum GG steigt die Entropie an = Verlust an Funktionalität, Nutzbarkeit, Verlust an Komplexität.
- **Deshalb ist die Entropie ein perfektes Kriterium für Nachhaltigkeit:**
je weniger Entropie ein Vorgang erzeugt, umso nachhaltiger (= umso weniger nicht-nachhaltig = umso weniger umweltschädlich) ist er.
- DAC/CCS/CCU, Geoengineering, Fe-Kreislauf sind nicht nachhaltig, die Krisen des Klimas und der Artenvielfalt muss gleichrangig und mit den gleichen Mitteln angegangen werden.
- Das Klima-Potenzial der natürlichen und der renaturierten Ökosysteme ist VIEL größer als das von Geoengineering, zugleich wirken ihre klimastabilisierenden Effekte auch dem Verlust der Artenvielfalt entgegen: Moore, Seegraswiesen, Mischwald uvam.
- Echt organische Biolandwirtschaft allein könnte in D bis 80 Mio t CO₂ in Böden speichern, sehr viel mehr, als CCS tatsächlich kann -
- - ohne zusätzlichen Energieverbrauch, ohne Rohstoffe für Anlagen und Pipelines, ohne Gefährdung der Meeresökosysteme, aber mit Artenvielfalt und gesunden Lebensmitteln!

Anregungen zum Nachlesen

- Mein Buch: „Was für ein Zufall! Zum Ursprung von Unvorhersehbarkeit, Komplexität, Krisen und Zeit
- bernhard@bernhard-wessling.com
- <https://www.bernhard-wessling.com>
- Artikel „Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit“ über meine Webseite zu finden:
www-bernhard-wessling.com/nachhaltigkeit_und_entropie
www-bernhard-wessling.com/cdr_bioagriculture_sustainability
: Naturwissenschaftliche Rundschau 5-2024
: Physik in unserer Zeit, 5-2025
- In Arbeit: „**Sustainability Reexamined: A Natural Science-Based Approach**“
(Buch mit SpringerNature, Ende 2026)

