

Quantenbiologie der Photosynthese - Eine Spurenlese von Quanteneffekten

Zufall und Komplexität sind Geschwister - Ein neuer Blick aus Sicht der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik

Salz, das weiße Gold - Die Kulturgeschichte einer einfachen Verbindung

„Junge Menschen früh begeistern und dann bei der Stange halten“ - Ein Gespräch über Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der GDNÄ

Nachlese der 200-Jahrfeier der GDNÄ: „Eine 40-jährige Reise zum Zentrum der Milchstraße“ • Magnet-

resonanz-Tomografie in Echtzeit - ein Paradigmenwechsel • Zeitaufgelöste Röntgenkristallographie • Bildanalyse und Bildverstehen für autonomes Fahren • Nanomaschinen bei der Arbeit • Von den Tiefen des Meeres bis zur Erforschung des Weltraums • Kurze Einführung in RNA-basierte Medizin • Bilder aus der Nanowelt • Wildtieren tropischer Regenwälder mit Kamerafallen auf der Spur • Informatik für die Bilder aus Hollywood

Rundschau

Kanadas Crawford Lake - Typuslokalität für das Anthropozän • Genregulator fördert den Abbau der Myelinscheiden • Mars-Gullies könnten doch von Wasser erzeugt worden sein

9/10

September/
Oktober 2023

76. Jahrgang

€ 25,75

E 9981

Naturwissenschaftliche Rundschau

Organ der
Gesellschaft Deutscher
Naturforscher und Ärzte

NR

903
904



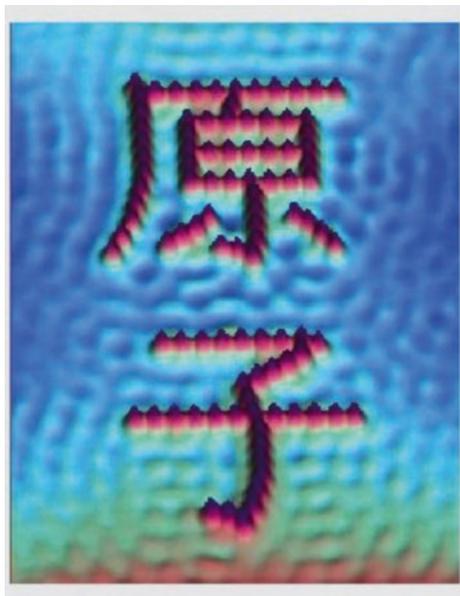
Zufall und Komplexität sind Geschwister

Quelle für beide: Energie und Entropie - Ein neuer Blick aus Sicht der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik

Es mag merkwürdig erscheinen, Zufall auf thermodynamischer Grundlage verstehen zu wollen, zumal mit Hilfe der Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik – und dann noch mit Komplexität in Verbindung zu bringen. Sind es nicht die Quanten mit ihrem Zufallsverhalten, die den Zufall auch in unsere makroskopische Welt gebracht haben? Es wird gezeigt, dass dies nicht der Fall sein kann und dass die Prigogine'sche Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik die Grundlage zum Verständnis von Zufall darstellt: Zufall und Komplexität sind über die Entropie miteinander verwandt. [1] Zugleich weist uns dies darauf hin, dass in der aktuellen Klimadebatte die Entropie bisher komplett ignoriert wurde.

Auf den ersten Blick scheinen Zufall und Komplexität nichts miteinander zu tun zu haben. Jeder Mensch erlebt so seine eigenen Zufälle, und fast jeder deutet sie für sich auch irgendwie. Vielfach wird auch die Ansicht vertreten, Zufall gebe es nicht. Nur unsere mangelhafte Kenntnis im Detail verhindere (noch) vollständige Vorhersagbarkeit der Zukunft (Determinismus), wie man an der nachträglichen Aufklärung scheinbar zufälliger Ereignisse erkennen könne. Aber: „Im Rückblick ergibt alles einen Sinn, und wir können nicht die mächtige Intuition unterdrücken, dass das, was heute im Rückblick einen Sinn zu ergeben scheint, gestern vorhersagbar war.

Abb. 1 Einzelne Eisenatome wurden im Rastertunnelmikroskop verschoben und stellen in chinesischen Schriftzeichen (gesprochen „yuan zi“) das Wort „Atom“ dar.



Die Illusion, wir verstünden die Vergangenheit, fördert die Überschätzung unserer Fähigkeit, die Zukunft vorherzusagen.“ Daniel Kahneman, Psychologe, Nobelpreisträger, in „Schnelles Denken, langsames Denken“ (Siedler-Verlag, Penguin Randomhouse, 2012, S. 127). Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist mir nur eine Hypothese bekannt: Zufälle entstünden aufgrund des zufälligen Verhaltens, aufgrund der Unschärfeneigenschaften der Quanten, der Elementarteilchen. So schrieb der Nobelpreisträger Manfred Eigen: „Der Zufall hat seinen Ursprung in der Unbestimmtheit dieser Elementarereignisse. [...] Unter speziellen Bedingungen kann es [...] zu einem Aufschaukeln der elementaren Vorgänge und damit zu einer makroskopischen Abbildung der Unbestimmtheit des mikroskopischen ‚Würfelspiels‘ kommen.“ [2] Mir ist nicht bekannt, wer diese Hypothese zuerst aufbrachte, sie wird gern und oft wiederholt.[3] Allerdings sind alle Autoren in den mir bekannten Veröffentlichungen Belege für diese Ansicht schuldig geblieben, ich kenne weder eine theoretische Herleitung noch irgendwelche experimentellen Hinweise, die eine solche Hypothese nahelegen. Es wird einfach das, was man über Quanten weiß, auf die makroskopische Welt übertragen. Mir scheint der Hintergrund eher im derzeitigen „Quantenhype“ zu liegen und darin, dass besonders in der Physik eine reduktionistische Sicht der Welt beliebt ist: Danach ließe sich alles an Phänomenen und Gesetzmäßigkeiten, was man auf höheren Ebenen der Organisation der Materie beobachten kann, letztlich aus fundamentalen Gesetzen der grundlegendsten Ebene, der Elementarteilchen, herleiten; „Emergenz“, also das Entstehen neuer Phänomene und Gesetzmäßigkeiten auf höheren Ebenen der Organisation der Materie (z. B. „Evolution“), sei nur Ausdruck von unvollständigem Wissen. [4] Einen konsequent reduktionistischen Standpunkt vertritt Sabine Hossenfelder. [5]

Nur hat man die Dekohärenztheorie, die der theoretische Physiker H. D. Zeh entworfen hat, übersehen.[6] Sie beschreibt die „umweltbedingte Quanten-Dekohärenz“, was bedeutet, dass die merkwürdigen Eigenschaften der Quanten dann, wenn sie mit der Umwelt in Kontakt kommen, nicht mehr beobachtet werden können. Ausgangspunkt dieser Überlegungen waren die Messungen, aus denen man auf den „Zufallscharakter“ der Quanten geschlossen hat: die Messung, mit einem makroskopischen Apparat vorgenommen, zeigt das beobachtete Quantum entweder mit dem Zustand 0 oder 1, aber nicht mit etwas dazwischen; wenn ein Quantum an einem Ort festgestellt wurde, dann war es dort und nicht woanders. Die Dekohärenz stellt ein großes Problem für die derzeit mit viel Aufwand erforschten Quantencomputer dar, und alle Versuche, Quanten zu untersuchen, erfordern einen massiven Aufwand (Vakuum und/oder Kühlung) mit dem Ziel, die Umwelteinflüsse zu minimieren.

Serge Haroche hat mit seiner Arbeitsgruppe die Dekohärenz experimentell an einem Rydberg-Atom in Wechselwirkung mit nur wenigen Photonen in einer Mikrowellen-Falle bestätigt, er erhielt dafür den Nobelpreis. [7] Schon Atome verhalten sich unter Normalbedingungen nicht mehr wie Quanten. Nicht anders ist zu verstehen, wie es möglich sein sollte, „IBM“ mit einzelnen Xenon-Atomen, oder die japanischen Schriftzeichen für „Atom“ mit Eisenatomen im Rastertunnelmikroskop zu „zeichnen“ (Abbildung 1). [8] Denn wenn diese Atome sich wie Quanten verhalten würden, würden sie sich nicht auf der Unterlage anordnen lassen und dort verbleiben.

Wir müssen uns also nach anderen Quellen für die Entstehung von Zufällen umsehen. Dazu schlage ich vor, die Komplexität in unserer Welt näher anzuschauen und den Begriff „Zufall“ von einer anthropozentrischen Betrachtung zu lösen. Man wird erkennen, dass solcherlei Ereignisse nicht nur uns Menschen geschehen (und auch nicht nur und besonders gern Forschern, die zufällig Röntgenstrahlen, Penicillin oder Viagra entdecken – lauter Dinge, die sie gar nicht gesucht haben), sondern schon immer im Universum weit verbreitet waren und sind.

Dies alles geschieht ständig, sowohl in der belebten wie auch der unbelebten Natur, sowohl auf der Erde wie überall sonst auch im Kosmos. Blitze, zum Beispiel: Wir können, selbst wenn der Wetterbericht für unsere Region „sehr wahrscheinlich einige Gewitter“ vorhersagt, nicht wissen, genau wann und wo Blitze auftreten werden, geschweige denn – wenn wir sie fotografieren würden – vorhersagen, welchen Verlauf der Blitz nehmen wird. Oder schauen wir zwei benachbart aufwachsende Eichen-Zwillinge an (Abb. 2): sie haben überhaupt nicht das gleiche Astbild.

So auch mit dem Wachstum der Blätter: Sie werden keine zwei Eichenblätter finden, die exakt gleich sind. Genauso wenig übrigens wie perfekt identische eineiige menschliche Zwillinge, die ja eine Menge von Unterschieden im Detail aufweisen, nicht zuletzt in ihren Fingerabdrücken. [9] Und genetisch identische Mäuse (Klone) entwickeln sogar, selbst wenn sie in der exakt gleichen Umgebung aufwachsen (nämlich gemeinsam in einem großen, vielfältig gestalteten Käfig), unterschiedliche Persönlichkeiten. Auch da muss der Zufall im Spiel sein – wir können



Abb. 2 Zwei direkt nebeneinander stehende, gleich alte Eichen zeigen nicht das gleiche Astbild. [Foto mit freundlicher Genehmigung von Dr. Limmer, naturfotografen-forum.de]

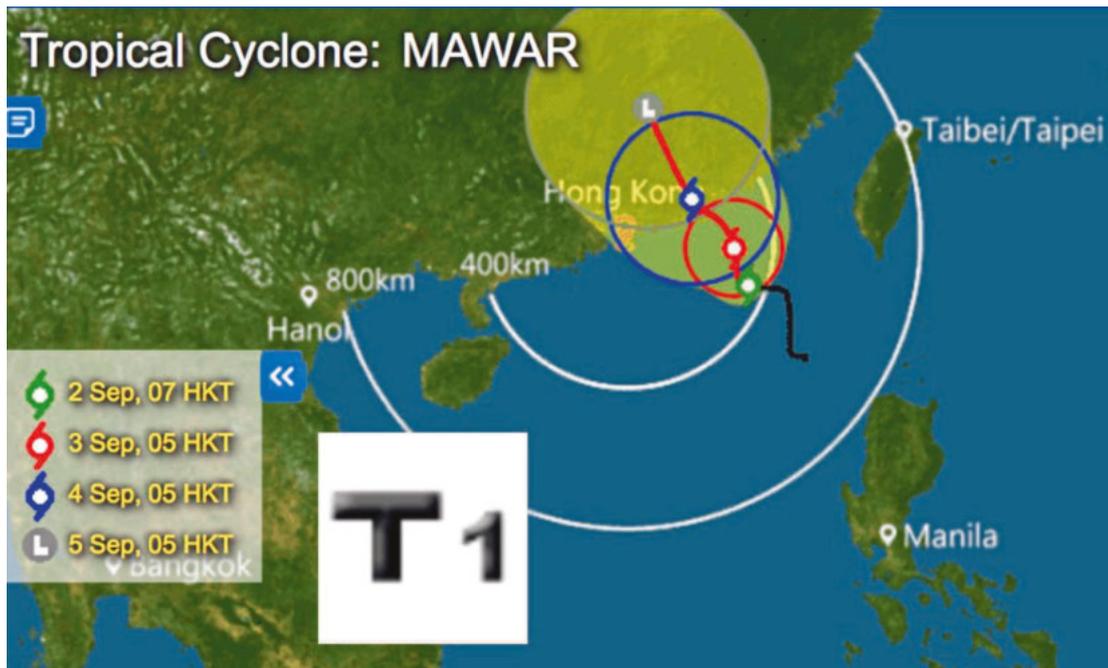


Abb. 3 Screenshot der Taifun-Vorhersage vom 4. 9. 2017 [Abb: Hong Kong Observatory]

überhaupt nicht voraussehen, welche der Klonmäuse welche Persönlichkeit entwickelt. [10]

Auch wenn wir bei flüchtiger Betrachtung meinen, Schneeflocken seien symmetrisch: sie sind es nicht; mehr noch; keine Schneeflocke sieht exakt so aus wie eine zweite. „Wetter“ ist uns vertraut als ein Phänomen, das uns sehr häufig damit überrascht, dass gar nicht das, was vorhergesagt wurde („Regen“), eingetreten ist. Ich habe 13 Jahre in China gelebt und viele Taifune erlebt, im letzten Jahr meiner Zeit dort etliche hintereinander, die z. T. auch über ShenZhen (wo ich lebte) hinweggezogen sind. Bei den Taifunen, die sich nicht weit entfernt von meinem Wohnort entwickelten, verfolgte ich die Vorhersagen mit Interesse. Im Normalfall wurden sie, je weiter der Taifun sich entwickelt hatte, immer genauer. Der Taifun „Mawar“ aber verhielt sich mehrfach gänzlich unvorhersehbar (Abb. 3):

Nicht nur wechselte er mehrfach drastisch die Richtung, sondern er wurde auch – obwohl er sehr langsam vorankam – trotz des warmen Meeres immer schwächer (vorhergesagt war eine Verstärkung bis in die höchste Kategorie). Bevor er weit über 12 Stunden später als erwartet an Land ging, und das ganz woanders, als ursprünglich prognostiziert, war er längst zu einem einfachen „tropischen Sturm“ degradiert worden.

Und schauen wir noch weit hinaus in den Kosmos: Es gibt, soweit man weiß, im von uns beobachtbaren Universum etwa 1 Billion Galaxien. Nicht eine einzige der bisher fotografierten Abermillionen von Galaxien sieht exakt aus wie eine zweite. Zwar teilt man (nach Hubble) die Galaxien in bestimmte Klassen und Unterklassen ein, daneben gibt es aber noch weitere Arten – und in all diesen Klassen sieht jede Galaxie einzigartig aus.

Essenzieller Zufall

Wir können somit direkt erkennen, dass die Begriffe „Komplexität“ und „Zufall“ sehr verwandte Phänomene bezeichnen: Wo in der komplexen Struktur des Astbilds eines Baumes der

nächste Ast entsteht, wo sich beim Wachstum der komplex strukturierten Schneeflocke das nächste Wassermolekül bzw. der nächste Wassermanokristall anlagert – das ist jeweils Zufall. Die Komplexität, Dynamik und bestenfalls kurzfristige Vorhersagbarkeit von Wetter und Klima ist Quelle des zufälligen Verhaltens des Taifuns.

Diese Art von Zufall nannte der Nobelpreisträger Jacques Monod „essenzieller Zufall“ und unterschied ihn von der Art, die wir vom Würfelspiel oder Roulette kennen (für die wir die Wahrscheinlichkeit des Eintretens aller möglichen Fälle kennen).[11] Essenzieller Zufall ist prinzipiell nicht vorhersehbar, er entspricht auch nicht einem Mangel an Kenntnis im Detail, sondern ist „essenzieller“ Bestandteil der Eigenschaften des Systems, in dem so ein Zufall geschieht. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens geht gegen Null. Und selbstverständlich sind solche Zufälle im Rahmen der Naturgesetze möglich (sonst geschähen sie nicht).

Als Beispiele für essenziellen Zufall hat sich Monod, selbst Biochemiker, besonders mit Mutationen beschäftigt: Es ist absolut unvorhersehbar, wann und an welcher Stelle der DNA eine Mutation eintreten wird und v. a. nicht, welcher Art: Wird eine Base falsch abgelesen, und welche andere wird statt der richtigen eingebaut? Oder wird eine Base ausgelassen, sodass sich die gesamte Reihe der Triplet-Codons ändert und ein vollkommen anderes Protein entsteht aus der Ablesung dieses Gens? Das alles ist schon unvorhersehbar, auch wenn man abschätzt, dass bei der Verdoppelung der DNA ein Ablesefehler mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 1 zu 1 Milliarde stattfindet, aber es bleibt unklar: welcher Fehler? Und: welche Folge wird ein solcher Fehler haben? Selbst wenn wir das herausgefunden haben, wissen wir immer noch nicht, ob sich daraus eine neue Tier- oder Pflanzenart entwickeln kann, die sich zudem – in den sich ebenfalls unvorhersehbar verändernden Ökosystemen – erst noch bewähren muss.

Was aber ist dafür verantwortlich, dass sich aus Zufall (genauer: wegen unzähliger Zufälle) unter Milliarden und Billionen von Galaxien zwar bestimmte Muster entwickeln (so wie wir unterschiedliche typische Muster bei Schneeflocken, Eichenkronen und Eichenblättern finden, die von Graupel und Hagel einerseits bzw. Weidenkronen oder Birkenblättern andererseits verschieden sind), aber die Detail immer anders ausfallen?

Ein Umweg über „leitfähige Polymere“ führt zum Verständnis

Der Auslöser meiner Forschung, die mich zu diesem Themenkreis führte, war die Entdeckung elektrisch leitfähiger Polymere, die kurz nach meinem Abschied von der Universität veröffentlicht worden war (und wofür die Entdecker 2001 den Nobelpreis bekamen). [12] Der erste Vertreter dieser neuen Stoffklasse, Polyacetylen, war aber nicht nur sehr oxidationsempfindlich, sondern auch unlöslich und unschmelzbar, also schon deshalb nach der Polymerisation nicht verformbar. Das stellte allein schon ein Problem für die Forschung dar, weil man reproduzierbare Proben für Untersuchungen erzeugen können muss; viel mehr noch aber für eine spätere praktische, industrielle Anwendung. Das regte uns an, darüber zu forschen, ob es möglich sein könnte, solche Stoffe zu dispergieren, anstatt sie auflösen oder schmelzen zu wollen, und wenn ja, worin zu dispergieren (und wie).

Dabei stellte es sich heraus, dass „Dispersion“ als solche gar nicht gut verstanden war, besonders nicht in Medien wie thermoplastischen Polymeren (PE, PS, PVC, PA, PMMA etc). Um Leitfähigkeit in solchen Medien zu erreichen (was für Anwendungen in der Elektronik-Industrie benötigt wird), kann man sog. „Leitruß“ einarbeiten, also Rußpartikel, die eine gewisse elektrische Leitfähigkeit (anstatische Eigenschaften) erzeugen. Das ist bereits „Dispergieren“, auch wenn oft nur der Begriff „Mischen“ verwendet wird.

Zur Erklärung, warum bei einer bestimmten Konzentration an Ruß im Medium ein ziemlich drastischer S-förmiger Sprung in der Leitfähigkeit (oder, wie in Abb. 4.2, ein Abfall des Wider-

stands, hier logarithmisch dargestellt [13]) geschieht, wird immer die „Perkolationstheorie“ verwendet. [14] Dazu nimmt man an – gestützt auf transmissionselektronenmikroskopische Bilder wie das in Abb. 4.1 [15] –, dass die Rußpartikel hoch-strukturiert seien und sozusagen viele „Ärmchen“ in alle Raumrichtungen besäßen. Deshalb könnte bereits eine geringe Konzentration (in der Grafik bei ca. 4%, in der Praxis oft bei 6 – 10%) den Leitfähigkeitsdurchbruch bewirken, an der „Perkolationsschwelle“ (vgl. Abb 4.2). Und es erfordere, dass man beim „Einmischen“ sehr vorsichtig vorgehen solle, um die „Ärmchen“ der Rußteilchen nicht abzubrechen.

Das schöne Bild in Abb. 4.1 hat lediglich den Nachteil, dass es nicht den Ruß zeigt, wie er innerhalb der Kunststoff-„Mischung“ vorliegt, sondern aus einer Lösemittel-Dispersion heraus, die man auf einem für TEM geeigneten Objektträger abgeschieden und dort trocknen gelassen hat. Damit kann man natürlich alles mögliche darstellen, denn so hatten die Rußteilchen ja noch allerlei dynamische Behandlungsschritte hinter sich. Man kann daraus nicht schließen, wie denn nun der Ruß nach der Einarbeitung in einer echten Dispersion im thermoplastischen Medium vorliegt, unterhalb und bei der kritischen Konzentration, bei der der Leitfähigkeitssprung stattfindet. Das aber wollte ich wissen.

Wir fanden bei der genauen Untersuchung heraus, dass alles ganz anders ist: Unterhalb der kritischen Konzentration (in Abb. 5 bei 0,5%) liegen die Rußteilchen komplett vereinzelt als vollständig dispergierte Nanoteilchen vor, aber man sieht wesentlich mehr, als bei 0,5% zu erwarten gewesen wären! [16] Das liegt daran, dass die Teilchen nach Dispersion nicht statistisch gleichmäßig im gesamten Volumen verteilt sind, sondern – wie wir feststellten – in sehr dünnen, lediglich einlagigen Schichten, die sich dreidimensional in Form von Röhrchen und dergleichen vernetzen.

Bei bzw. knapp oberhalb der kritischen Volumenkonzentration (im Falle von Abb. 6 bei 6% in Polystyrol) hat sich ein großer Teil zuvor voneinander getrennt dispergiert vorliegenden Teil-

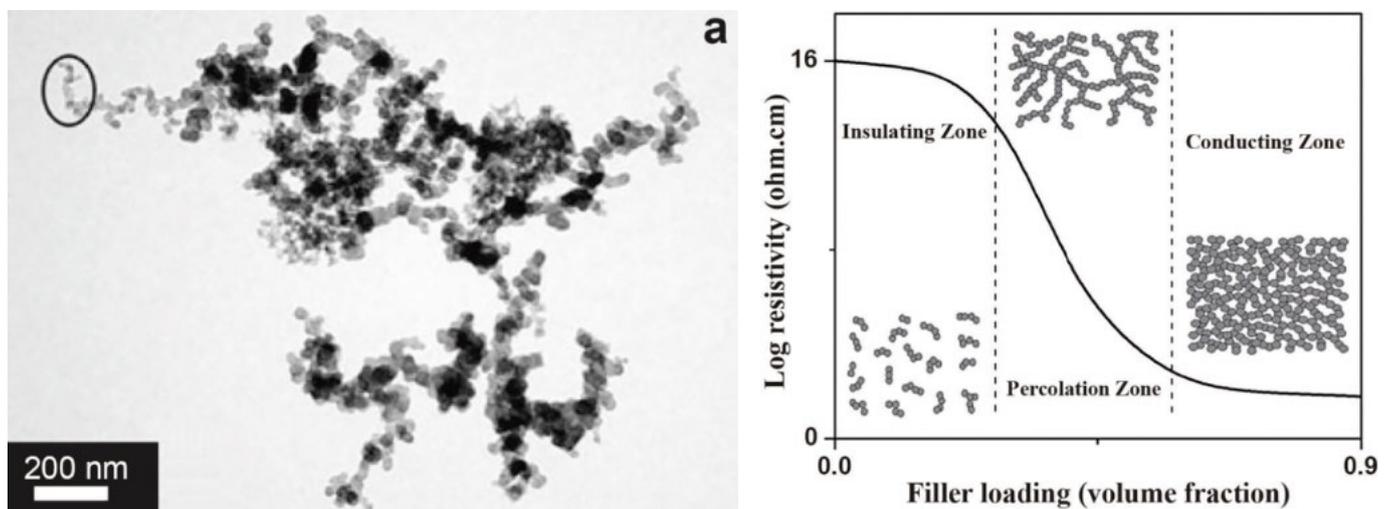


Abb. 4.1 (l): Transmissionmikroskopische Aufnahme von Rußteilchen nach Entfernung der Polymermatrix mit Lösemitteln und anschließender Trocknung. - **4.2** (r): Schematische Darstellung der (experimentell nicht belegten) Annahme, wie Rußteilchen in einer Polymermatrix verteilt vorliegen und entsprechend Perkolationstheorie elektrische Leitfähigkeit verursachen. [Abb. mit freundlicher Genehmigung von SpringerNature]

chen zu verzweigten Ketten organisiert („Selbstorganisation“). Die geschieht offenbar, weil die einlagigen Schichten, in denen sich die dispergierten Teilchen befinden, „überfüllt sind“. Bei der Bildung der Teilchen-Ketten verlieren die Teilchen einen Teil der zuvor bei der Dispersion auf der Oberflächen adsorbierten monomolekularen Schicht des polymeren Dispersionsmediums, die dann über viele Teilchen hinweg eine gemeinsame schlauchartige Hülle bildet.

Dadurch rücken die Rußteilchen nah genug zusammen, so dass Elektronen von Teilchen zu Teilchen hüpfen können (ein Quantenvorgang: Tunneln). „Dispersion“ muss nach diesen Erkenntnissen (die hier nur sehr oberflächlich und summarisch dargestellt werden können) ganz anders als weithin bekannt und schon gar nicht als einfache Verteilung von Teilchen in einem Medium verstanden werden. Auch in niederviskosen flüssigen Medien finden analoge Prozesse statt. Basierend auf die-

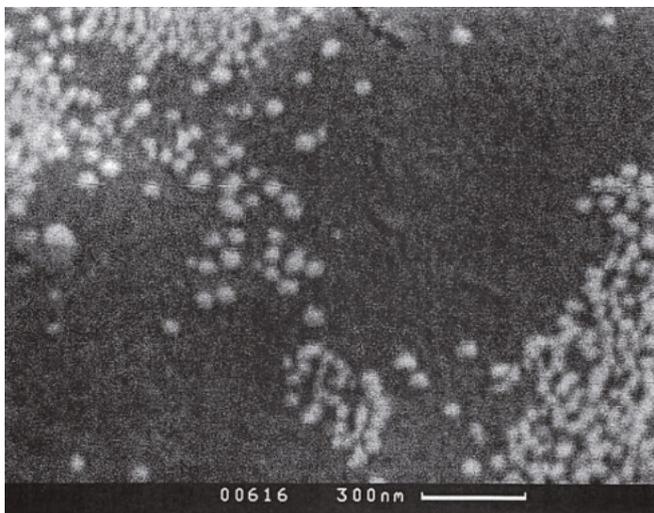


Abb. 5 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der tatsächlichen Anordnung dispergierter Rußteilchen in einer Polymermatrix weit unterhalb der Schwelle für Leitfähigkeit (0,5%). [Aufnahme: B. Weißling]

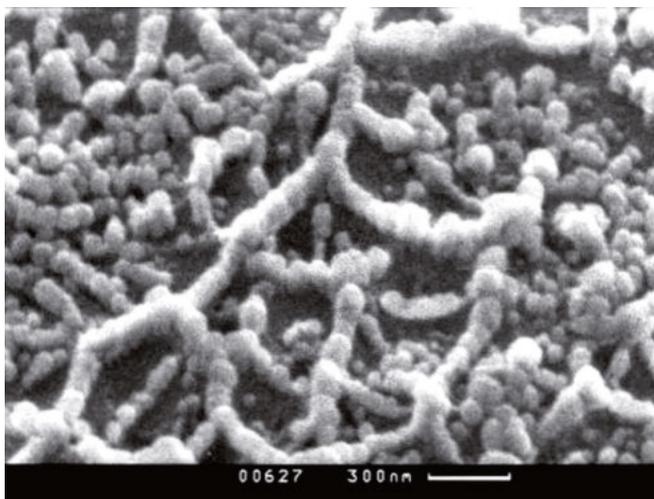


Abb. 6: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der tatsächlichen Anordnung dispergierter Rußteilchen in einer Polymermatrix, bei einer Konzentration von knapp oberhalb der Leitfähigkeitsschwelle, bei 6%. [Aufnahme: B. Weißling]

sen Erkenntnissen (mit zusätzlich einer Menge weiterer Forschungsergebnisse) gelang es, leitfähige Polymere (und speziell Polyanilin) dispergierbar und in Form von Dispersionen im Markt verfügbar und sogar erfolgreich zu machen. [17]

Entscheidend für Dispersion ist, wie sich gezeigt hat, dass im Medium innere Oberflächen geschaffen werden (siehe Grafik Abb. 7), dazu ist Turbulenz erforderlich.

Damit sind solche Systeme (wie alle Dispersionen und Emulsionen) Nicht-Gleichgewichts-Systeme, und zwar fern vom Gleichgewicht. Das liegt v.a. am spezifisch hohen Energieaufwand, der für die Erzeugung der Turbulenz – um die inneren Oberflächen bereitzustellen – erforderlich ist. [18] Und wie wir an Abb. 6 sehen, sind die dabei spontan entstehenden Strukturen ebenfalls sehr komplex und immer wieder einmalig – wie genau die Strukturen aussehen, ist dem Zufall überlassen.

Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik und dissipative Strukturen

Die Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik wurde von Ilya Prigogine grundlegend entwickelt, er erhielt dafür 1977 den Nobelpreis. [19] Er beschrieb erstmalig Selbstorganisation zu komplexen Strukturen: „dissipative Strukturen“. „Dissipativ“ deshalb, weil sich offene Systeme aufgrund eines überkritischen Energieinputs fern vom Gleichgewicht befinden und den Energiefluss nicht anders kompensieren („dissipieren“) können, als durch Bildung komplexer Strukturen, was mit einem starken Entropiefluss nach außen, aus dem offenen System heraus, verbunden ist.

Besonders plastisch wird dies beim Betrachten von Bénard-Zellen (Abb. 8). Diese entstehen, sobald man eine mit Öl (zur besseren Sichtbarkeit enthält es feine Metallspäne) gefüllte Glasschale von unten beheizt und die Energiezufuhr langsam steigert. Bei einer charakteristischen Wärmezufuhr bilden sich plötzlich diese Zellen, weil das Öl anders die überkritische Hitze nicht dissipieren kann: Die Zellen rollen synchron! [20]

Prigogine untersuchte besonders auch zyklische Reaktionen, darunter die Belousov-Zhabotinsky-Reaktion. Diese bildet immer wieder im Detail anders aussehende komplexe Muster (Abb. 9). [21] Nach Prigogine ist dies der Tatsache geschuldet, dass ein überkritischer Energieinput ein offenes System in einen Zustand fern vom Gleichgewicht zwingt, wobei Entropie exportiert wird. Und das ist der entscheidende Punkt, der das herkömmliche, auf der klassischen Gleichgewichts-Thermodynamik beruhende Verständnis grundlegend erweitert:

Während auf der Ebene des Universums die Entropie ständig ansteigt und nur ansteigen kann, ist dies innerhalb eines offenen Systems nicht (zwangsläufig) der Fall. Entropie kann exportiert werden, wird also vermindert – und ein niedrigerer Entropiegehalt entspricht nach der statistischen Interpretation von Boltzmann einem höheren Grad an Ordnung. Je geringer die Entropie, umso komplexer die Ordnung: Ein regelmäßiger Kristall weist eine höhere Entropie auf als eine Eichenkrone, denn im beliebig kleinen oder beliebig großen benachbarten Volumensegment befinden sich die Elemente des Systems (hier: die Zellen, die Äste und Rinde bilden) an jeweils anderer Stelle.

The Principle of Dispersion

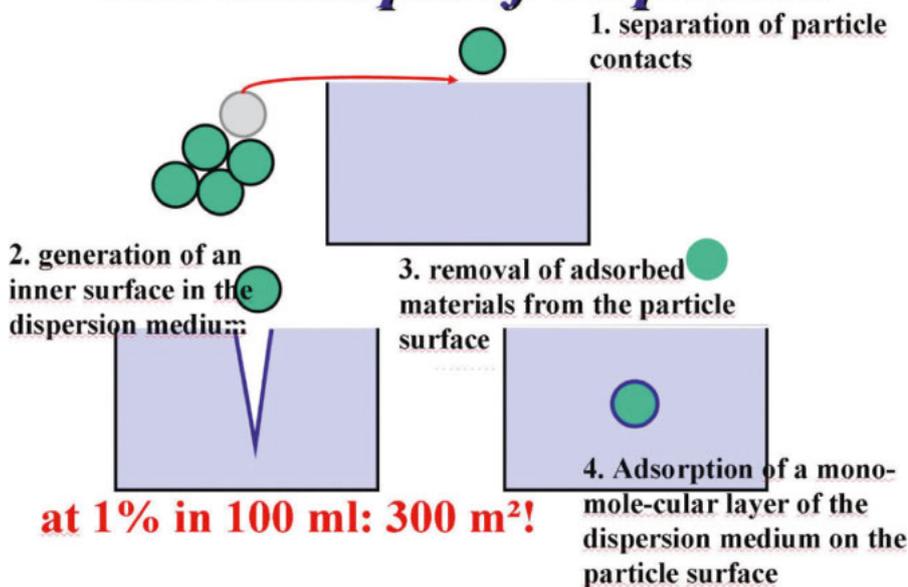


Abb. 7 Schematische Darstellung der entscheidenden Schritte bei der Dispersion. [Grafik: B. Weßling]

Während die (freie) Energie im Gleichgewicht einem Minimum zustrebt und entsprechende Prozesse spontan und reversibel ablaufen, erreicht die Entropie ein Maximum. Ganz anders im Nicht-Gleichgewicht: Die Energie steigt ständig an (der Energiezufluss hält an), die Entropie erreicht niedrigere Werte, und nach einigen Bifurkationsereignissen können irreversibel relativ stabile Zustände erreicht werden, die aber früher oder später dem Verfall unterliegen, wenn sie nicht mit weiterem Energiezufluss stabilisiert werden.

Ursache dafür ist die Tatsache, dass in all solchen Nicht-Gleichgewichts-Systemen Prozesse ablaufen, die mit nicht-linearen Gleichungen beschrieben werden; und diese Prozesse wechselwirken auch noch miteinander, was das Ganze extrem nicht-linear macht. In anderen Worten: Es ist prinzipiell nicht vorhersehbar, wie sich die nicht-linear ablaufenden Prozesse, die sich noch gegenseitig beeinflussen, schließlich auswirken. Das führt dazu, dass sich im Verlauf der Zeit, während die überkritische Energiemenge (und womöglich auch Materie) in das offene System einströmt, immer wieder „Bifurkationen“ (wie Prigogine es nannte) ereignen: Das System kann unvorhersehbar plötzlich einen anderen Verlauf nehmen.

Abb. 10 zeigt schematisch den prinzipiell verschiedenen Verlauf von Prozessen, die (Abb. 10.1) zu einem Gleichgewichtszustand führen, bzw. (10.2) in einem Nicht-Gleichgewichtssystem.

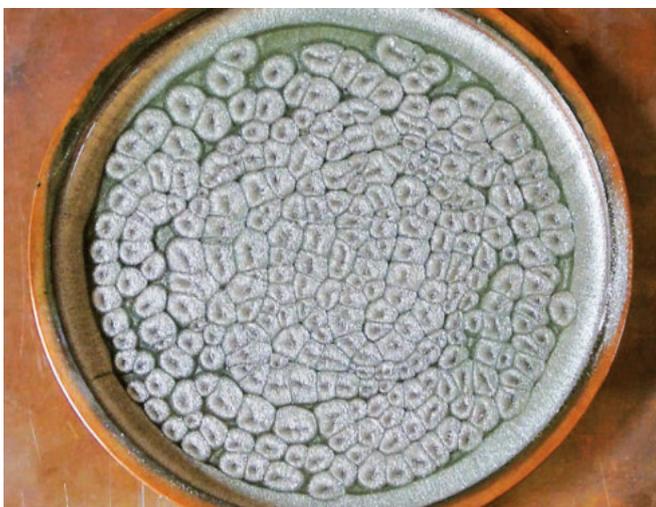


Abb. 8 Bénard-Konvektion. [Abdruck mit freundlicher Genehmigung der Fakultät für Physik der Universität Freiburg]

Das kennen wir aus dem Leben, nur ist häufig nicht bekannt, dass „Leben“ (also z. B. Organismen und Ökosysteme), aber auch unbelebte dynamische Systeme wie Flüsse, Wetter oder Galaxien, nicht mit Hilfe der Gleichgewichts-, sondern nur mit Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik beschrieben werden können: Entropie wird aus offenen dynamischen Systemen ständig exportiert (letztlich ins Universum, dort vermutlich in Schwarze Löcher), und die Prozesse sind nicht-linear, wechselwirken auch noch nicht-linear miteinander. Komplexität und Zufall sind somit sehr eng miteinander verwandt. Nicht-Gleichgewicht ist, was uns am Leben erhält, „Gleichgewicht ist Verfall und Tod.“ [22]

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

Manche mögen denken, dass dies ja recht theoretische Betrachtungen seien und „Entropie“ bestenfalls interessant sei für eine „akademische Diskussion“ (was ich gelegentlich so als Antwort bekomme). Dem muss man entschieden widersprechen. Grundsätzlich ist die Prigogine'sche Thermodynamik eine mit der Relativitätstheorie, der Quantenphysik und der Evolutionstheorie gleichrangige Säule für das Verständnis unserer Welt: Wir benötigen alle diese Theorien (und einige mehr) für ein umfassendes Verständnis unserer Welt. So wird sie aber gar nicht wahrgenommen, sie ist schon an Universitäten so gut wie nicht verbreitet, wird in Thermodynamik-Lehrbüchern auf wenig mehr als 20 Seiten kurz abgehandelt, die Gleichgewichts-Thermodynamik aber auf den übrigen 900 Seiten. Und das, obwohl es in der Realität außer Zuckerwasser und mit Wasser verdünntem Alkohol kaum Gleichgewichts-, weit überwiegend aber Nicht-Gleichgewichts-Systeme und -Prozesse gibt. In der chemischen Forschung und der industriellen Praxis finden nur Nicht-Gleichgewichts-Prozesse statt. Im Gegensatz zu den anderen drei grundlegend wichtigen Theoriegebäuden findet Nicht-Gleichgewichts-Thermodynamik in Schulen gar nicht statt. Während man beliebig viele populärwissenschaftliche Bü-



Abb. 9 Schnappschuss aus einem Video, das den immer anders aussehenden Ablauf der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion beispielhaft zeigt. [Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Stephen Morris/ Univ. of Toronto (Kanada) und Mike Rogers]

cher für unterschiedliche Niveaus der Vorbildung finden kann, wenn man etwas über Relativität, Quanten oder Evolution erfahren möchte, gibt es erst ein einziges solches Buch über Thermodynamik, Nicht-Gleichgewicht und Entropie. [23]

So hat sich auch unser Sprachbild nicht weiterentwickelt: Ständig beklagen wir, dass etwas „nicht mehr im Gleichgewicht“ sei (und wünschen uns, es möge wieder ins Gleichgewicht kommen, als ob es jemals dort gewesen ist): Ökosysteme, das Klima, die Wechselkurse und überhaupt das Finanzsystem. Und das Grundgesetz verlangt, dafür zu sorgen, dass „den Erfordernissen des gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts Rechnung“ getragen werde. [24] Erstaunlicherweise wird das sog. „Gleichgewicht“ aber nur bewahrt, wenn die Wirtschaft wächst; schon bei Stagnation, also bei Nullwachstum, ist das Gleichgewichtserfordernis nicht mehr erfüllt.

Die Tatsache, dass es die Welt mit uns darin nur gibt, weil erfreulicherweise alles NICHT im Gleichgewicht ist, sondern es sich statt dessen in mehr oder weniger stabilen dynamischen

Prozessen fern vom Gleichgewicht bewegt, ist weithin unbekannt. Ebenso ist die Bedeutung und die Rolle der Entropie überwiegend unverstanden.

Zur aktuellen Klimadiskussion findet man in diversen Medien mehr und mehr Veröffentlichungen über Verfahren, mit denen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt und entweder in tiefen Erdschichten endgelagert oder über chemische Verfahren einer Nutzung zugeführt werden könnte. [25] Investoren und Politiker befassen sich ernsthaft damit, ein krasses Beispiel sind „E-Fuels“. [26]

Es wird keineswegs unkritisch berichtet, aber die Diskussion beschränkt sich auf Risiken und Kosten.

Der Energiebedarf (etwa 1.000 kWh pro Tonne aus der Atmosphäre entferntem CO₂ [27]) wird, falls überhaupt, kommentarlos erwähnt; dass dies dem Vierfachen dessen entspricht, was wir an nutzbarer Energie zur Verfügung gestellt bekommen haben [28], als wir 1 Tonne CO₂ erzeugt haben, ist den Journalisten nicht klar, den Betreibern, Investoren und Politikern, die darüber entscheiden, offenbar auch nicht. Ebensov wenig, dass sich das überhaupt nicht ändert, wenn „regenerative Energie“ dafür bereitgestellt würde: Weder haben wir unendlich viel davon, noch können wir sie kostenlos ernten, und auch bei dieser Energiewandlung entsteht eine Menge Entropie.

Diese aber wird in der öffentlichen Diskussion gar nicht berücksichtigt. Allein schon die Mischungsentropie (die wir beim Entmischen der Gase, also der Abtrennung des CO₂ von den übrigen Bestandteilen der Luft aus der behandelten Luft heraus exportieren müssen „in die Umwelt“, denn CO₂-ärmere Luft beinhaltet weniger Entropie) ist gewaltig. [28] Zusätzlich wird Entropie durch die Bereitstellung der notwendigen Energie erzeugt.

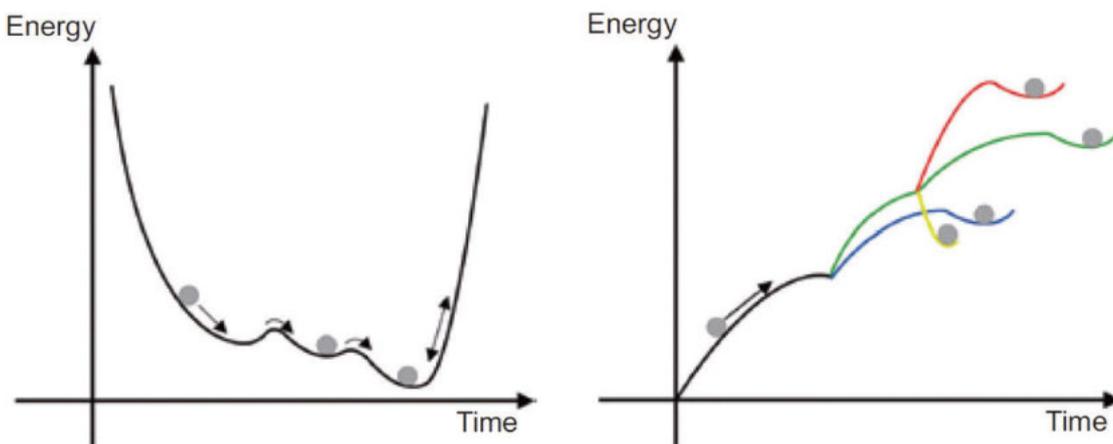


Abb. 10.1 (l): Energie-Zeit-Diagramm – thermodynamisches Gleichgewicht, reversible Vorgänge. -**10.2** (r): Energie-Zeit-Diagramm – thermodynamisches Nicht-Gleichgewicht, irreversible Vorgänge. [Grafik: B. Weßling]

Das mag manchen als sehr theoretisch vorkommen, ist es aber nicht: Verarmte Ökosysteme, lebensfeindliche Landschaften, totgespritzte Äcker mit weniger als einem Zentimeter Humus, Abwärme, Abfallberge, verschmutzte Gewässer und Meere, Rückgang der Biodiversität (Vögel, Insekten!) usw. sind Anzeichen der Entropie, „Verschmutzung“. Weder in punkto Energie, noch hinsichtlich Entropie ist CO₂-Endlagerung oder -Nutzung nachhaltig. Das Klima- und das Biodiversitätsproblem kann nur gemeinsam gelöst, im wesentlichen mit Hilfe der Photosynthese in möglichst naturnahen, möglichst wild gelassenen Ökosystemen, Feuchtgebieten, Mooren, mit weltweit praktizierter Bio-Landwirtschaft. Technologie kann uns bei effizienten industriellen Verfahren helfen, aber nicht bei der CO₂-Endlagerung.

Letztlich kann Entropie als Kriterium für Nachhaltigkeit angesehen werden. Alle Prozesse, die Menschen betreiben, sollten zusammen mit natürlichen Quellen nicht mehr Entropie erzeugen, als die Erde insgesamt abstrahlen kann (das sind etwa 230 W/m² Erdoberfläche [29]). Davon sind wir weit entfernt.

Literatur

[1] B. Weßling, „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“, SpringerNature Oktober 2022; englisch: „What a Coincidence! On Unpredictability, Complexity and the Nature of Time“, SpringerNature April 2023 – [2] M. Eigen, R. Winkler, „Das Spiel – Naturgesetze steuern den Zufall“, Serie Piper 1975, S. 35 – [3] z.B. F. Aigner „Der Zufall, das Universum und du – die Wissenschaft vom Glück“, Brandstätter 2016. – [4] Henning Genz: „Reduktionismus beschreibt eine Auffassung vom tatsächlichen Funktionieren der Welt; Emergenz steht gegebenenfalls für unseren Mangel an Einsicht in dieses Funktionieren.“ (aus „Wie die Zeit in die Welt kam – Die Entstehung einer Illusion aus Ordnung und Chaos“, Rowohlt Taschenbuch 2002, S. 284) – [5] S. Hossenfelder „Mehr als nur Atome“ (Buch rezensiert in NR Nr ...) – [6] H. D. Zeh „On the interpretation of measurements in quantum theory“, Found. Phys. 1 (1970), 69–76. – [7] M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, A. Maali, C. Wunderlich, J. Raimond, S. Haroche, Observing the Progressive Decoherence of the “Meter” in a Quantum Measurement, Phys Rev Lett 77 (24) 4887 – 4890 (1996) – [8] <https://funsizephysics.com/scanning-tunneling-microscopy/#> – [9] <https://www.derstandard.de/story/2000143424649/warum-eineiige-zwillinge-unterschiedliche-finger-abdruecke-haben> – [10] <https://www.wissenschaft.de/erde-umwelt/zwillinge-gleich-und-doch-verschieden-2/> – [11] J. Monod, „Zufall und Notwendigkeit – Philosophische Fragen der modernen Biologie“, Piper-Verlag 1996 (die Originalausgabe erschien 1970: „Le Hasard et la Nécessité“, Éditions du Seuil) – [12] H. Shirakawa, E.J. Louis, A.G. MacDiarmid, C.K. Chiang and A.J. Heeger, J Chem Soc Chem Comm (1977) 579 – [13] Abb. 10, S. 169 in M. Rahaman, A. Aldabahi, L. Nayak, R. Giri, „Electrical Conductivity of Polymer-Carbon Composites: Effects of Different Factors“ in: M. Rahaman et al. (eds), Carbon-Containing Polymer Composites, Springer Series on Polymer and Composite Materials, SpringerNature Singapore 2019, Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature. – [14] D. Stauffer et al. in: <https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-To-Percolation-Theory-Stauffer-Aharony/66c431c2dfe70556dc021cf0e1b8a62c2531922f> – [15] M. Spahr, R. Gilardi, D. Bonacchi, „Carbon Black for Electrically Conductive Applications“, Chapter 19, Abb. 2a (p. 380) in R. Rotho (ed.), „Fillers for Polymer Applications“, Polymers and Polymer Composites, a Reference Series, Springer Intl. Publishing Switzerland 2017; Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Springer Nature. – [16] Nähere Erläuterungen in B. Weßling „Was für ein Zufall!“ und im dazu gehörenden Anhang, siehe <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-37755-7> – [17] Näheres dazu bei B. Weßling, „Was für ein Zufall!“ (a. a. O., Fußnote 1) sowie B. Weßling, „Anhang zum Buch ‚Was für ein Zufall!‘“, digital verfügbar SpringerNature 2022, Print-Ausgabe über www.bord.de, Buchshop, Buch 9783756221172; siehe auch

<https://www.bernhard-wessling.com/basic-research> sowie https://www.researchgate.net/profile/Bernhard_Wessling – [18] B. Weßling, Critical Shear Rate, Z. Phys. Chem. in https://www.researchgate.net/publication/202290104_Critical_Shear_Rate_-_the_Instability_Reason_for_the_Reaction_of_Dissipative_Structures_in_Polymers; eine erste parameterfreie Theorie der Turbulenz nicht-newtonscher Flüssigkeiten: H. Baumert, B. Weßling, Phys. Scripta, in https://www.researchgate.net/publication/301816877_Turbulent_mixing_and_a_generalized_phase_transition_in_shear-thickening_fluids – [19] <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1977/press-release/> – [20] <https://www.experimente.physik.uni-freiburg.de/Thermodynamik/waermeleitungundkonvektion/konvektion/benardkonvektionszellen/> – [21] Fotos und Videos mit einem typischen Ablauf der Reaktion: <https://www.flickr.com/photos/nonlin/3572095252/in/album-72157623568997798/> – [22] Ludwig von Bertalanffy, im Original lautet das Zitat: „Biologically, life is not maintenance or restoration of equilibrium but is essentially maintenance of disequilibria, as the doctrine of the organism as open system reveals. Reaching equilibrium means death and consequent decay.“ in: „General Systems Theory“, Verlag George Braziller, N. Y. 1968, S. 191 – [23] Das Buch „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“ (B. Weßling, Fußnote 1) ist ein erster Versuch, diese Lücke in sehr einfach verständlicher und erzählender Form zu füllen. – [24] Art 109, Absatz 2 lautet: „Bund und Länder erfüllen gemeinsam die Verpflichtungen der Bundesrepublik Deutschland aus Rechtsakten der Europäischen Gemeinschaft aufgrund des Artikels 104 des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft zur Einhaltung der Haushaltsdisziplin und tragen in diesem Rahmen den Erfordernissen des gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts Rechnung.“ – [25] hier eine unvollständige Übersicht: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/der-bunkerplan-a-2c1925c4-8b2f-422f-a837-7fae20c1ce3a>; <https://www.wissenschaft.de/bdwpplus/heute-uebeltae-ter-morgen-held/>; <https://www.zeit.de/zeit-magazin/2023/20/wissenschaft-ungeloeste-frage-raetsel#koennen-wir-den-klimawandel-aufhalten-indem-wir-kohlendioxid-in-seine-elemente-aufspalten>; <https://www.spektrum.de/magazin/co2-entsorgung-ein-endlager-fuer-treibhausgas/2128557> – [26] <https://www.freiepresse.de/nachrichten/sachsen/wissing-e-fuels-fuer-autoverkehr-unverzichtbar-artikel12886746> – [27] <https://www.mdr.de/wissen/co-zwei-aus-der-luft-saugen-100.html>, vgl. <https://www.scientificamerican.com/article/rare-mantle-rocks-in-oman-could-sequester-massive-amounts-of-co2/> – [28] www.bernhard-wessling.com/co2_und_entropie, hier auch weitere Berechnungen inkl. quantitativer Abschätzung der Entropie-Erzeugung. – [29] W. Ebeling, R. Feistel, „Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft“, Konferenz „The Human World: Uncertainty as a Challenge“, Frolov Lectures 2017, zugänglich hier: https://www.researchgate.net/publication/316878591_Selbstorganisation_in_Natur_und_Gesellschaft_und_Strategien_zur_Gestaltung_der_Zukunft, vgl. auch R. Feistel, W. Ebeling, „Physics of Self-Organisation and Evolution“, Wiley-VCH 2011, S. 97/98.



Dr. **Bernhard Weßling** ist Chemiker, Unternehmer, Naturforscher. Zahllose Zufälle warfen ihn in einem Leben voller Komplexität von der Naturstoff- in die Polymerchemie, zu leitfähigen Polymeren und in kolloidale Systeme, Nicht-Gleichgewichtsthermodynamik und Turbulenzphysik. Weitere Zufälle verlangten sehr früh unternehmerisches Risiko und führten ihn für 15 Jahre nach China. Nebenher betrieb er ehrenamtlich (ohne Amt, auch international) Kranichforschung und trug zu mehreren

Artenschutzprojekten aktiv bei; seit 2009 betreibt er Artenschutz als Investor und Geschäftsführer in einem inzwischen großen Biohof (450 ha Pachtland, 7 eigene Hofläden, 90 Mitarbeiter). Über seine Arbeiten publizierte er zwei Bücher: „Was für ein Zufall! Über Unvorhersehbarkeit, Komplexität und das Wesen der Zeit“ und „Der Ruf der Kraniche“ (beide auch auf englisch erschienen). www.bernhard-wessling.com