

Oberhessische Naturwissenschaftliche Zeitschrift

Bericht der Oberhessischen Gesellschaft
für Natur- und Heilkunde zu Gießen

Naturwissenschaftliche Abteilung

Natur  OHG 1833

Band 68

Gießen 2020

ISSN 0340-4498

Redaktion und Schriftleitung:

Dr. Michael Serafin

Riegelpfad 64

35392 Gießen

email: Michael.Serafin@t-online.de

Vertrieb:

Geschäftsstelle der Oberhessischen Gesellschaft

für Natur- und Heilkunde

- Naturwissenschaftliche Abteilung-

c/o Universitätsbibliothek

Frau Hochstein

Otto-Behaghel-Straße 8

35394 Gießen

Dieser Band erscheint auch in gedruckter Form in der
"Oberhessischen Naturwissenschaftlichen Zeitschrift", Volume 68, Gießen 2020

Inhaltsverzeichnis

Oberhessische Naturwissenschaftliche Zeitschrift, Band 68, 2020

Editorial	4
OEDER, R. & SCHWABE, D.:	
Die Aufwärtsneigung der Wabenzellen erhöht die Tragfähigkeit der Wabe und hat nicht den Zweck, das Auslaufen des Honigs zu verhindern	8
KAFITZ, W.:	
Entropie	
Wachsende Bedeutung in Naturwissenschaft und Informationstheorie	
Eine Übersicht in Beispielen	26
Nachruf Prof. Dr. Ernst Ludwig Sattler	64
Kurzfassung von Vorträgen, die in der Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde – Naturwissenschaftliche Abteilung – gehalten wurden	
BÜCHLER, R. (12.12.2017)	
Bienensterben, Insektensterben – Kann es gestoppt werden?	
Wo liegen die Gefährdungen?	65
RÜHL, M. (14.11.2018)	
Speisepilze – Perspektiven für eine gesunde, aromatische und nachhaltige Lebensmittelversorgung	66
ENGELHORN, H. R. (19.06.2019)	
Die Energiewende, eine kritische Analyse der Stromversorgung aus energietechnischer Sicht	68
APPEL, TH. (11.02.2020)	
Humus: Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit, die Umwelt und das Klima	69

EDITORIAL

Vor Ihnen liegt ein Band der Oberhessischen, naturwissenschaftlichen Zeitschrift in einem Jahr, das uns allen in Erinnerung bleiben wird. Corona, das SARS-CoV-2 Virus mit der teilweise schweren oder sogar tödlichen COVID-19 Erkrankung, haben die Welt in Unordnung gebracht. Es ist zu befürchten, dass diese Unordnung anhält und die Pandemie die Menschen weltweit in Atem halten wird. In Rekordzeit entwickelte Impfstoffe geben Hoffnung. Aber die logistische Herausforderung an die Impfung von Millionen Menschen sind enorm.

Auch das Vereinsleben der Oberhessischen, naturwissenschaftlichen Gesellschaft hat massiv darunter gelitten. Es gab keine Exkursionen und nur einen Vortrag im Jahr 2020 und die Mitgliederversammlung musste ebenfalls auf unbestimmte Zeit verschoben werden. Umso wichtiger war es uns, wenigstens einen weiteren Band der Zeitschrift zu veröffentlichen.

Die beiden wissenschaftlichen Beiträge im neuen Band 68 könnten vor diesem Hintergrund kaum unterschiedlicher sein.

Es geht einerseits um Bienenwaben, die schon fast ein Sinnbild von Regelmäßigkeit, Symmetrie, Ordnung und natürlicher Schönheit sind. Sie stehen aber nicht im Bienenstock wie die Bücher im Regal. Ihre Zellen sind leicht nach oben geneigt. Logisch, hat man seit Jahrhunderten praktischer Imkererfahrung und wissenschaftlicher Beschäftigung mit Bienen gedacht:



Abbildung 1: Verkehrte Bienenwelt - Brutfläche auf einer Wabe mit nach unten geneigten Zellen

¹ Die Abbildung stammt aus dem Beitrag von Robert Oeder und Dietrich Schwabe im vorliegenden Band Nr. 68.

Der Honig darf nicht herauslaufen und die Brut für die nächste Bienengeneration darf nicht herausfallen.

Doch unsere wissenschaftlichen Autoren schreckten vor einem Experiment nicht zurück, das man früher sowohl als Imker als auch Biene als böswillig bezeichnet hätte. Sie hängten einige Waben kopfüber in den Stock, so dass die Zellen nach unten geneigt waren. Nach bisheriger Logik hätte das zum Ausfließen des Honigs führen müssen. Doch die Bienen waren nicht nachtragend und haben diese verkehrte Welt klaglos akzeptiert. Sie waren nach wie vor fleißige Bienen beim Honig sammeln und genauso fürsorglich gegenüber der nächsten Generation. Weder der Honig lief aus, noch entstanden Nachteile für die junge Brut.

Doch warum findet man auf den Waben in natürlich angelegten Bienenstöcken keine kreuz und quer angeordneten Zellen? Dieser Frage kamen die Autoren durch einen Trick auf die Spur. Sie brachten die Bienen dazu, Waben von unten nach oben zu bauen, also genau entgegengesetzt zu ihrem natürlichen Bauverhalten. Und siehe da, auch in diesem Fall sind die Zellen nach oben geneigt. Damit war klar: Die Gravitation ist für die Bienen die entscheidende Richtgröße für die Neigung der Wabenzellen. Dabei erweisen sie sich auch als geschickte Statiker. Denn die leichte Aufwärtsneigung der Wabenzellen erhöht die Tragfähigkeit in dem Wabengebilde, weil dadurch erstaunliche 10 % des Gewichtes auf die Mittelwand gelenkt werden. Die Bienen haben also gute Gründe für die traditionelle Orientierung der Wabenzellen. Aber die Argumente dafür haben sich geändert.

Wir wissen nun etwas mehr über eines der am besten untersuchten Tiere und ihr Verhalten beim Bau ihrer Waben.

Dagegen steht der Begriff Entropie im zweiten Aufsatz für Unordnung bis hin zum Chaos, für unvermeidbare Reibungsverluste, für Irreversibilität. Entropie hat verhindert, dass der Traum vieler Forscher- und Tüftlergenerationen in Erfüllung ging: Es kann kein Perpetuum Mobile geben. Entropie ist der Preis, den die Menschen zahlen müssen, wenn sie Energie aufwenden, um mit einer Maschine Arbeit zu verrichten. Ein Wirkungsgrad von 100% kann es nicht geben. Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass in einem geschlossenen System die Entropie höchstens gleich bleibt, in der Regel aber zunimmt.

Entropie ist aber auch Unwissen über ein System, also die Information, die fehlt, um einen Zustand genau zu beschreiben. Entropie hat den Beginn der industriellen Revolution mit geprägt, als es darum ging, Dampfmaschinen so

effizient, wie möglich zu machen. Nun ist Entropie von ähnlicher Bedeutung für unser Informationszeitalter mit dem Bit als zentralem Begriff geworden. Die Entropie in der Informationstheorie stellt sich als quantitativ gleich zur Entropie in der Thermodynamik heraus.

Jeder kennt Vorgänge, die nicht reversibel sind. Das Ei, das vom Küchentisch fällt, die zerbrochene Vase oder das Glas, das entzwei geht. Dass ein Film rückwärts läuft, wird meist sofort erkannt. Daran wird klar, was die wahre Ursache von Vergangenheit und Zukunft ist. Das zerbrochene Ei hat eine wesentlich größere Entropie und der reversible Vorgang ist so unwahrscheinlich, dass das vielfache Alter des Universums nicht ausreicht, damit er passiert und beobachtet werden kann.

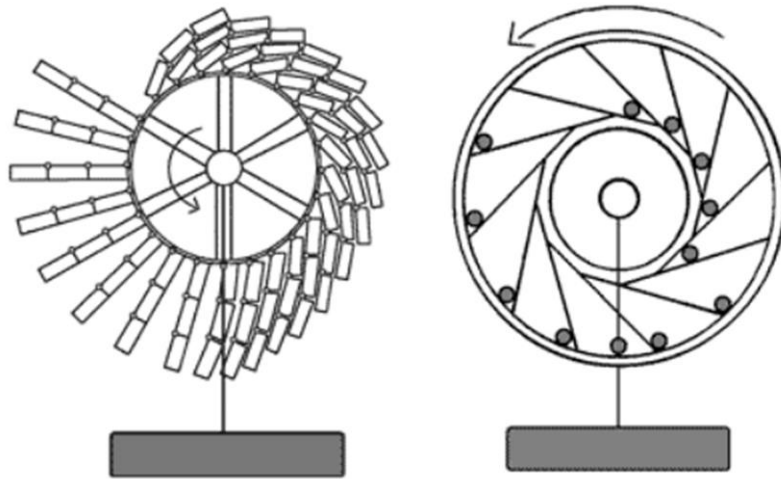


Abbildung 2: *Unmögliche Erfindungen:
Es kann kein Perpetuum Mobile geben²*

Entropie bestimmt also die Richtung des Zeitpfeils. Entropie ist die Ursache, dass die Vergangenheit die Zukunft bestimmt und nicht umgekehrt – getrennt durch einen physikalisch, religiös und philosophisch schwer fassbaren Begriff, den man Gegenwart nennt.

Entropie ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil von Theorien in der Astronomie und der Kosmologie geworden. Schwarze Löcher sind nach aktuellen Erkenntnissen keine Objekte mehr, denen nichts entkommen kann. Man kann ihnen eine Entropie und damit eine Temperatur zuordnen. Sie geben Wärmestrahlung ab und verletzen damit nicht den 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

² Die Bilder in Abbildung 2 stammen mit freundlicher Genehmigung zum Nachdruck von Thomas Kitzmann und seiner Webseite www.perpetuum-mobile.de.

Auch in der Kosmologie kommen Ideen auf, die Entropie als wesentliche Triebkraft postulieren. Hier kann die Kombination aus Informationstheorie und Thermodynamik, nicht zuletzt in Verbindung mit der Quantenmechanik, neue Erklärungsmuster bis hin zu neuen Gravitationstheorien und einer neuen Sicht auf das Universum liefern.

Beim deterministischen Chaos, auf Basis im Prinzip bekannter Naturgesetze oder bekannter Mathematik (und nicht zu verwechseln mit Zufall), hilft Entropie, dass wir Zusammenhänge und Muster im Chaos erkennen können. Lineare Beziehungen reichen nicht aus, um chaotisches Verhalten vieler Systeme in der Natur und der Mathematik zu erklären und wachsende Entropie im Sinne der Thermodynamik oder im Sinne der Informationstheorie ist die Triebkraft vieler chaotischer Phänomene.

Entropie bestimmt unser Leben in grundlegender Beziehung: In der Technik, in der Wissenschaft, im Verständnis der Zeitläufe und in der alltäglichen Praxis.

Es wird Zeit, Entropie als Inbegriff der Unordnung, aber auch als treibende, in die Zukunft gerichtete Größe im physikalischen Weltgeschehen zu würdigen.

Gießen, im Dezember 2020

Dr. Willi Kafitz

Dr. Michael Serafin

Die Aufwärtsneigung der Wabenzellen erhöht die Tragfähigkeit der Wabe und hat nicht den Zweck, das Auslaufen des Honigs zu verhindern

ROBERT OEDER und DIETRICH SCHWABE *)

Zusammenfassung

Die Zellen der Waben von *Apis mellifera* sind um etwa 13° nach oben geneigt. Laut Literatur dient diese Neigung dazu, das Auslaufen des Honigs zu verhindern. Wir haben dies überprüft, indem wir leere Waben kopfüber in Bienenstöcke gehängt haben. In diese invertierten Honigwaben haben die Bienen Honig genauso eingetragen wie in normal orientierte Waben. Sie haben die invertierten Waben auch gut angenommen, um Brut aufzuziehen. Wir haben damit gezeigt, dass für die Bienen der Nutzen der Neigung der Zellen nach oben nicht darin besteht, das Auslaufen des Honigs zu verhindern. Honig befindet sich auf den hydrophoben, mikrostrukturierten Zellwänden offenbar in einem Wenzel-Zustand. Die damit verbundene Benetzung der Zellwände erzeugt Adhäsionskräfte, die das Auslaufen verhindern. Wie unsere Analyse der Gewichtskräfte gezeigt hat, besteht der Nutzen für die Bienen aus der Neigung der Zellen darin, dass dadurch etwa 10 % des Gewichts des Zellinhalts auf die Mittelwand gelenkt werden, was die Tragfähigkeit der Wabe erhöht.

Schlüsselwörter: Wabenarchitektur / Neigung der Zellen nach oben / Tragfähigkeit der Waben / Auslaufen von Honig / Benetzung der Zellwände durch Honig

Einleitung

Bienenwaben werden seit jeher für die ansprechende Genauigkeit ihres sechseckigen Zellmusters bestaunt. Ebenso für ihr geringes Gewicht, für ihre hohe Tragfähigkeit und für die Mehrzweckverwendung für die Lagerung von

*) R. Oeder, Lärchenstraße 16, D-84533 Markt, e-mail: robert-oeder@web.de

D. Schwabe, I. Physikalisches Institut der Justus-Liebig-Universität Gießen
Heinrich-Buff-Ring 16, D-35392 Gießen,
e-mail: Dietrich.Schwabe@physik.uni.giessen

Dieser Artikel ist in englischer Sprache erschienen in *Apidologie* (2020).

<https://doi.org/10.1007/s13592-020-00807-9>

Dieser Beitrag erscheint auch in gedruckter Form in der "Oberhessischen Naturwissenschaftlichen Zeitschrift", Volume 68, Gießen 2020

Honig und die Aufzucht von Brut im gleichen Zelltyp. Das sechseckige Muster ist so faszinierend, dass sich selbst Mathematiker und Philosophen damit beschäftigt haben. Im 19. Jahrhundert entstand das Konzept, Bienen und Waben nicht getrennt zu betrachten, sondern ein Bienenvolk mit einem einzigen Tier gleichzusetzen. In der modernen Biologie ist der Begriff Superorganismus (Bienen) etabliert als Ausdruck dafür, dass ein Bienenvolk einem Säugetier mit seinen Organen und Eigenschaften entspricht (Tautz 2008). Die Gesamtheit der von den Bienen selbst produzierten Waben wird als integraler Bestandteil und als besonders wichtiges Organ dieses Superorganismus angesehen (Pratt S.C. 2004). Die Waben sind nicht nur Lebensraum, Nahrungsspeicher und Kinderstube, sondern dienen dem Superorganismus als Skelett, Sinnesorgan, Nervensystem, Gedächtnisspeicher und Immunsystem. Da ein Bienenvolk nur als unteilbares Ganzes lebensfähig ist, ist es wichtig, die Eigenschaften und Funktionen seiner Organe zu untersuchen, um die Biologie des Superorganismus umfassend zu verstehen. Dies gilt insbesondere für die Waben mit ihren vielfältigen Funktionen und ihren Wechselbeziehungen mit anderen Organen des Volkes. Eine bisher wenig beachtete Eigenschaft der Waben ist die Neigung ihrer Zellen um ca. 13° nach oben (Abb. 1). Diese Besonderheit wird in sehr wenigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen lediglich erwähnt, ohne tiefgreifende Überlegungen dazu. Schon früher haben Wissenschaftler angenommen, dass die Gesamtstruktur der Waben ein Grund für die Stärke ihrer Konstruktion ist. Für Maraldi (1712) besteht der Vorteil der Pyramidenform des Bodens und der Verzahnung der Zellen darin, dass die drei prismatischen Wände, die sich an einer Kante treffen, als Unterstützung für den Boden einer gegenüberliegenden Zelle dienen. Auch Vogt (1911) sieht eine Erklärung für die Form der Wabenzelle in der dadurch erreichten Festigkeit der Struktur. Nur Hüsing und Nitschmann (1987) beschreiben in ihrer Enzyklopädie en passant und ohne Erklärung die Neigung der Zellen als einen Grund für die Stabilität und die Tragfähigkeit der Waben. Für Oeder und Schwabe (2017a, b) war die Neigung der Zellen ein Argument gegen die Hypothese, dass Bienen zuerst Zylinder bauen, die dann in hexagonale Zellen umgewandelt werden (Pirk et al. 2004). Es gibt auch eine weit verbreitete, aber unbewiesene Meinung in der Literatur, die als „historische Wahrheit“ angesehen werden könnte, dass die Neigung der Zellen das Auslaufen des Honigs verhindern soll (von Frisch 1959; Hüsing und Nitschmann 1987; Dietemann et al. 2011; Tautz 2012; Gallo und Chittka 2018; Wahyudi 2018). Diese Erklärung scheint so überzeugend und offensichtlich zu sein, dass es Wissenschaftler bis heute nicht für wert befunden haben, ihren Wahrheitsgehalt experimentell zu überprüfen.

Eine Ausnahme ist Müllenhoff (1883), der feststellte, dass die Neigung der

Zellen für die Bienen sehr wichtig ist: „Diese Neigung der Zellen gegen die Mittelebene ist zwar ziemlich gering, ist aber doch für die Thiere von grosser Wichtigkeit; in solche Waben, welche vom Bienenzüchter in umgekehrter Stellung in die Rahmen eingeklebt sind, tragen die Arbeiterinnen keinen Honig ein; auch benutzt die Königin sie nicht zur Ablage der Eier; derartige Waben bleiben vielmehr im Bienenstocke unbeachtet stehen oder werden abgebrochen“. Dies ist die einzige Arbeit, die auf eine experimentelle Überprüfung der „Honigauslaufhypothese“ hinweist. Es gibt jedoch keine Beschreibung des Versuchsaufbaus von Müllenhoff. Wir haben seine Aussagen überprüft, indem wir den Bienen invertierte Waben in Honig- und Brutraum von Bienenstöcken anboten.

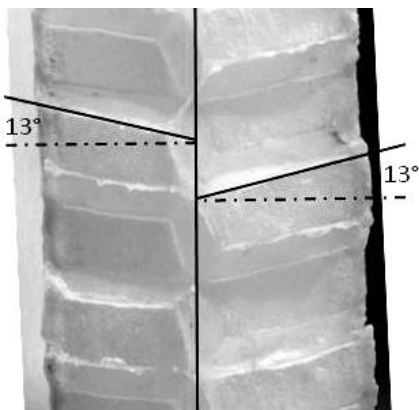


Abb.1 Foto eines vertikalen Schnitts durch eine Wabe senkrecht zur Mittelwand mit Darstellung der Aufwärtsneigung der Zellen um 13° . Die Linien und die Winkel wurden unter Verwendung von MS PowerPoint gezeichnet bzw. bestimmt, wie in Kapitel 2.3 beschrieben

Mit unseren Untersuchungen wollten wir herausfinden, ob die obigen Überzeugungen und Aussagen experimentell bestätigt werden können. Ein gründliches Verständnis der Wechselwirkung von hydrophilen Flüssigkeiten (Honig) mit hydrophoben Festkörperoberflächen (Bienenwachs) ist hierfür unerlässlich. Dieses Thema wird in der neueren Literatur im allgemeinen Kontext der Benetzung von Oberflächen umfassend behandelt. Neuere physikalisch-chemische Studien beschreiben ein bisher unbekanntes Benetzungsverhalten von Wasser und Honig auf Bienenwachs (Guo et al. 2015), das für die vorliegende Arbeit von großem Interesse ist. Vor diesem Hintergrund kamen wir bei der Diskussion unserer Ergebnisse zu neuen Erkenntnissen über das Auslaufen des Honigs, was uns wiederum zu einer neuen Interpretation der Neigung der Wabenzellen und ihres Nutzens für die Bienen führte.

1) Material und Methoden

a. Standort und Umgebung der Bienenvölker

Wir haben die Experimente Mitte April 2018 mit insgesamt sechs Bienenvölkern (*Apis mellifera carnica*) begonnen, um herauszufinden, wie sich die Neigung der Zellen auf den Honigeintrag auswirkt. Zwei Bienenvölker befanden sich im Südosten Bayerns (463 m und 370 m ü. NN) und vier etwa

400 km entfernt in Oberhessen (198 m ü. NN). Eines der Völker in Bayern stand in einem Wohnbereich und eines in einem landwirtschaftlichen Gebiet. Der Standort in Hessen befand sich in einer Siedlung mit landwirtschaftlichen Flächen in etwa 300 Metern Entfernung. An allen Standorten gab es Obstbäume und wir gehen davon aus, dass der in dieser Zeit gesammelte Nektar hauptsächlich von diesen Bäumen stammt (Pfirsich, Kirsche, Apfel und Pflaume). Während des Testzeitraums von Mitte April bis Anfang Mai 2018 war das Trachtangebot sehr gut.

b. Herstellung von invertierten Waben

Für unsere Experimente verwendeten wir ausgeschleuderte und trockene Waben mit Mittelwand vom Vorjahr mit einer Zellgröße von 5,2 mm. Unmittelbar nach dem Schleudern waren diese Waben etwa 48 Stunden lang in Bienenstöcke zurückgehängt und von den Bienen gründlich gereinigt und repariert worden. Wir verwendeten Rähmchen mit den Maßen 2/3 Langstroth und 1/2 Deutsch Normal.

Die Ohren an den Oberträgern der Testrähmchen wurden abgeschnitten, damit sie kopfüber in die Zargen passen. An den Unterträgern wurden Nägel so tief eingeschlagen, dass die hervorstehenden Eisenstifte als Auflage für die Waben im Honigraum dienen konnten. Die so präparierten Waben wurden mit den Oberträgern nach unten in die Mitte der Honigräume der Testvölker gehängt. Die Zellen dieser Waben waren jetzt nach unten geneigt. Die Zellen aller anderen Waben rechts und links davon waren nach oben geneigt. Zu bemerken ist, dass die Beuten in Hessen zwei Bruträume hatten, die Beuten in Bayern nur jeweils einen. Die Honig- und Bruträume waren in allen Fällen durch ein Absperrgitter getrennt.

Die Bienenstöcke bestanden aus handelsüblichen, geschlossenen Zargen, die innen dunkel waren. Zum Wiegen wurden die Waben bei Tageslicht einige Minuten lang aus den Bienenstöcken entnommen und dann sofort wieder in den dunklen Bienenstock gehängt. Die invertierten Waben und ihre direkten Nachbarn wurden im Abstand von einigen Tagen mit digitalen Küchenwaagen (± 1 g) gewogen, um ihre Gewichtszunahme zu messen.

c. Messung des Neigungswinkels

Alle Zellen der normal ausgerichteten Waben, mit Ausnahme derjenigen, die direkt am Oberträger angebaut sind, waren gegenüber der Horizontalen um 13° nach oben geneigt. Da es für unsere Experimente irrelevant war, den genauen Winkel zu kennen, haben wir diesen auf zwei Arten nur grob gemessen. Wir platzierten ein Rähmchen mit einer Naturbauwabe vertikal auf einem Tisch und schauten vor einem hellen Hintergrund horizontal in die

Zellen. In dieser Position erscheint die Spitze des rhombischen Zellbodens nahe der unteren Spitze des hexagonalen Querschnitts der Zelle. Dann kippten wir das Rähmchen in Richtung des Betrachters, bis die Spitze des Zellenbodens in die Mitte der Zelle verschoben war. An einem Winkelmesser konnten wir ablesen, dass das Rähmchen um etwa 13° gekippt war.

Eine zweite Möglichkeit, den Neigungswinkel zu messen, bestand darin, ein Foto eines vertikalen Schnitts durch eine Naturbauwabe aufzunehmen und das Foto in MS PowerPoint einzufügen. Wir haben die Mittelwand mit einer geraden Linie markiert. Zwei weitere Linien, die anfangs parallel zur Mittellinie waren, wurden mit der Drehoption von MS PowerPoint gedreht, bis sie mit je einer Kante gegenüberliegender Zellen zusammenfielen (Abb. 1). Die Drehwinkel betragen 77° und 103° , was einem Neigungswinkel der Zellen von 13° auf beiden Seiten der Wabe entspricht. Wir haben daher diesen Neigungswinkel von 13° , der mit der Literatur übereinstimmt (Martin und Lindauer 1966), für unsere weiteren Überlegungen angewandt.

d. Benetzung in der Zelloberfläche mit Wassertropfen

Wir haben Experimente durchgeführt, um das Befüllen von Zellen mit Honig in einem frühen Stadium zu simulieren. Einzelne Wassertropfen füllen nicht den gesamten Querschnitt einer Zelle aus. Wenn ein Tropfen in der Zelle gehalten wird, während die Öffnung nach unten gedreht wird, würde dies zeigen, dass der Tropfen allein durch Adhäsionskräfte an der hydrophoben Zellwand haftet. Dazu haben wir mit einem vertikalen Schnitt eine Zellreihe aus einer Wabe heraus präpariert. Wir hielten die Zellen mit der Öffnung senkrecht nach oben und pipettierten jeweils einen Wassertropfen hinein. Die Tropfen fielen in die Zellen ungefähr bis zur Verbindungslinie zwischen Zellwand und Zellboden. Dann drehten wir die Öffnung der Zellen nach unten und wiederholten das Experiment ungefähr 10 Mal, immer mit einer anderen Zelle. Die Tropfen hatten ein Volumen von ca. $60 \mu\text{l}$, was in etwa dem Honigmagenvolumen einer Biene entspricht. Wir konnten das Verhalten der Tropfen in der Zelle trotz des geringen Kontrasts im Gegenlicht beobachten.

e. Wabenbau von unten nach oben

Um die Frage zu beantworten, ob die Neigung der Zellen von der Richtung abhängt, in der die Bienen die Wabe bauen, wollten wir die Bienen dazu bringen, eine Wabe von unten nach oben zu bauen. Dazu haben wir ein Rähmchen ohne Oberträger vorbereitet (siehe Abb. 4) und in die Mitte des Honigraums gehängt. Wir haben die Beute mit einer dünnen Plastikfolie abgedeckt, wie sie Imker häufig verwenden. Die Bienen bauten eine Wabe auf dem Unterträger des nach oben offenen Rähmchens von unten nach oben. Da wir positive Ergebnisse aus Vorversuchen hatten, beschränkten wir uns auf ein

einziges Experiment unter kontrollierten Bedingungen.

f. Bienenbrut in invertierter Wabe

Um herauszufinden, ob die Bienen invertierte Waben für die Brutaufzucht akzeptieren, haben wir eine solche Honigwabe ausgeschleudert. Diese Wabe wurde in der Mitte des Brutraums eines Bienenstocks, der aus 2/3 Langstroth-Zargen bestand, zwischen normal orientierte Waben eingehängt. Nachdem die invertierte Wabe in den Bienenstock eingesetzt worden war, wurde sie sofort von den Bienen besetzt. Die Einbindung der umgekehrten Wabe in das Brutnest bereits nach einem Tag wurde durch die Tatsache unterstützt, dass sich auf den benachbarten Waben Brut befand. Für das Experiment verwendeten wir zwei invertierte Waben in verschiedenen Bienenvölkern.

2) Ergebnisse

a. Speicherung von Honig in invertierten Waben

Ziel unserer Experimente war es zu beobachten, ob die Bienen Honig in den umgekehrten Waben speichern und wenn ja, was mit dem Honig passiert. Wenn die Neigung der Zellen nach oben das Auslaufen des Honigs verhindern soll, sollte der Honig aus nach unten geneigten Zellen auslaufen oder gemäß Müllenhoff (1883) von den Bienen gar nicht erst eingebracht werden.

Zu unserer Überraschung lagerten die Bienen den Honig in die invertierten Waben auf die gleiche Weise ein, wie in die benachbarten normal ausgerichteten Waben. Nach 17 bis 23 Tagen waren die invertierten Waben voll und verdeckelt (Abb. 2). Zu keiner Zeit konnten wir an den umgekehrten Waben ein Auslaufen von Honig feststellen.

Das Anfangsgewicht am Tag Null auf der x-Achse ist für die jeweils drei benachbarten Waben nicht immer gleich, da zu Beginn der Versuche in einigen Waben neben der invertierten Wabe bereits Honig eingelagert worden war. Die unterschiedlichen Anfangsgewichte hatten keinen Einfluss auf unsere Ergebnisse, da für uns nicht das absolute Gewicht der Waben wichtig war, sondern die jeweilige Gewichtszunahme. Unterschiede zwischen den Waben in einem Bienenstock sind zu erwarten, wenn die Bienen verschiedene und wechselnde Wege durch die Bruträume nehmen, um zu den Honigwaben zu gelangen. Die Unterschiede in der Gewichtszunahme der Waben von Bienenstock zu Bienenstock dürften hauptsächlich auf unterschiedliche Volksstärken und unterschiedliche Wetterbedingungen zurückzuführen sein, die die Trachtsituation beeinflussen. Der entscheidende Punkt ist, dass die Gewichtszunahme für die invertierten im Vergleich zu den benachbarten normal orientierten Waben zeitlich ungefähr parallel verlief.

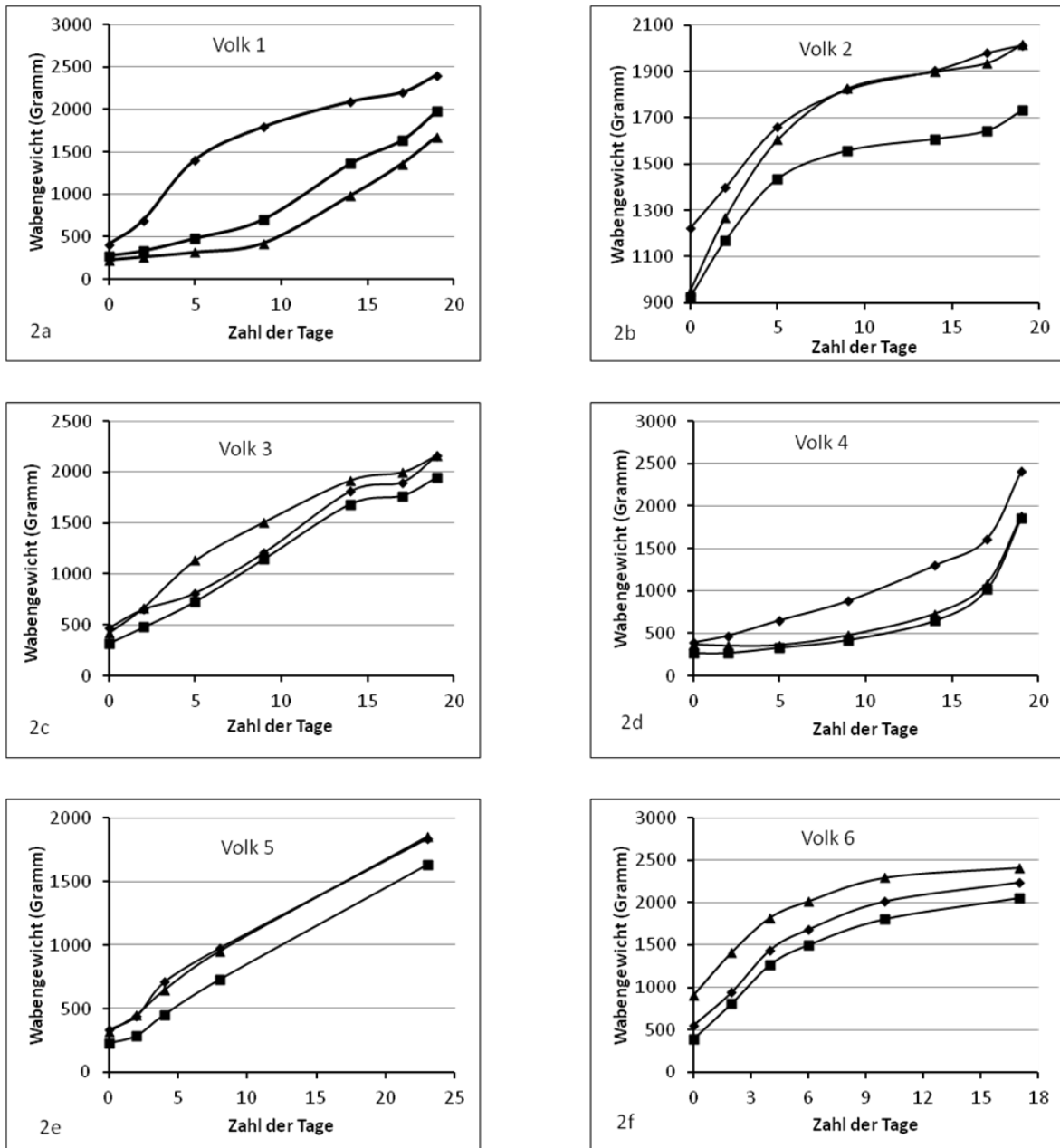


Abb. 2 Gewichtszunahme von drei untersuchten Waben in jedem der sechs Bienenstöcke. Null auf der x-Achse zeigt den Beginn der Wägungen an, gefolgt von weiteren Wägungen nach der jeweiligen Anzahl von Tagen. Die invertierte Wabe wurde in die Mitte des Honigraums zwischen Wabe 4 und Wabe 6 positioniert. Die Linien für die Wabengewichte in den Grafiken sind mit den folgenden Symbolen gekennzeichnet: ◆ Wabe 4 auf der linken Seite der invertierten Wabe von der Rückseite des Bienenstocks aus gesehen, ■ invertierte Wabe, ▲ Wabe 6 auf der rechten Seite. Die Völker 1-4 (2a-2d) befanden sich in Hessen, die Völker 5 und 6 (2e, 2f) in Bayern

Die Gewichtszunahmen aller Waben verlaufen grob parallel und es gibt keinen Hinweis darauf, dass normal orientierte Zellen für die Honiglagerung von den Bienen gegenüber den invertierten bevorzugt werden. In Bezug auf das Verdeckeln (z. B. die Wölbung der Deckel) konnten wir visuell keinen Unterschied zwischen den invertierten und den benachbarten Waben feststellen (Abb. 3).

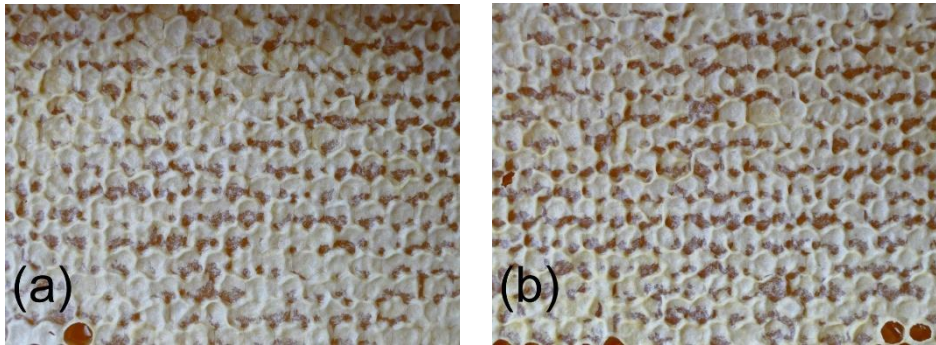


Abb. 3 An der Verdeckelung insgesamt und an der Form der einzelnen Deckel sehen wir keine Unterschiede zwischen den normal ausgerichteten Waben (3a) und den invertierten Waben (3b). Einige größere Zellen (vermutlich Drohnenzellen) am unteren Rand der Fotos erscheinen dunkel und sind nicht verdeckelt, da sie noch nicht vollständig mit Honig gefüllt sind

b. Verhalten einzelner Wassertropfen in einer Zelle

Wir wollten eine Vorstellung vom Verhalten der ersten Honigtropfen bekommen, die von den Bienen in eine Zelle eingelagert werden. Zu diesem Zweck haben wir einzelne Wassertropfen mit einem Volumen von jeweils etwa 60 μl mit einer Pipette in eine Zelle getropft. Diese Tropfengröße entsprach ungefähr der Honigmagenkapazität der Honigbiene. In diesem Experiment konnten keine Kapillarkräfte wirksam werden, da die Tropfen den Querschnitt der Zelle nicht vollständig ausfüllten. Die Tropfen blieben jedoch an ihrem ursprünglichen Platz in der Wabenzelle, auch wenn die Öffnung der Zelle nach unten gedreht wurde.

c. Von unten nach oben gebaute Waben

Gibt man den Bienen ein Rähmchen, das nur einen Unterträger hat und ansonsten oben offen ist oder oben von einer dünnen Plastikfolie abgedeckt ist, an der die Bienen keine Wabe anbauen, können die Bienen bei guten Trachtbedingungen beginnen, eine Wabe von unten nach oben zu bauen. Die Bienen bauten tatsächlich eine Wabe von unten nach oben und wir erwarteten, dass die Zellen dann von der Mittelwand bis zur Öffnung der Zellen nach unten geneigt sind. Aber auch in diesem Fall waren die Zellen nach oben geneigt (Abb. 4 und Abb. 5).

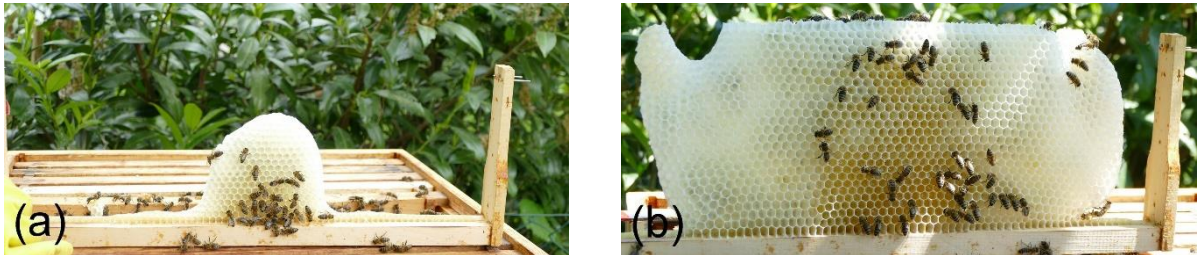


Abb. 4 Von unten nach oben gebaute Wabe in einem Rähmchen ohne Oberträger; (a) Ausgangszustand, (b) fertig gebaute Wabe



Abb. 5 Die von unten nach oben gebaute Wabe wurde auseinandergeschnitten und die beiden Teile gegeneinander gelegt. Die Neigung der Zellen ist ebenfalls nach oben gerichtet wie bei einer von oben nach unten gebauten Wabe

d. Brut auf invertierten Waben

Nach dem Schleudern des Honigs und nach dem Reinigen der Wabe durch die Bienen wurde eine invertierte Wabe in den Brutraum eines Bienenvolks gehängt, das in einem Bienenstock gehalten wurde, der aus 2/3 Langstroth Brut- und Honigräumen bestand. Die Königin hat sofort Brutflächen mit nur wenigen Lücken auf beiden Seiten der invertierten Wabe angelegt (Abb. 6). Die Wabe wurde mehrmals bebrütet.



Abb. 6 Brutfläche auf einer Wabe mit nach unten geneigten Zellen

Das widerlegt die Behauptung von Müllenhoff (1883), dass Honigbienen keine invertierten Waben für die Aufzucht der Brut annehmen. Da es keine

Beschreibung dieser älteren Experimente gibt, können wir die möglichen Gründe, die zu seinen gegenteiligen Ergebnissen geführt haben, leider nicht nachvollziehen.

3) Diskussion

a. Die Adhäsion von Honig an den Zellwänden verhindert das Ausfließen

Es stellt sich die Frage, welche Mechanismen verhindern, dass Honig aus den nach unten geneigten Zellen austritt, obwohl Bienenwachs hydrophob ist.

Das Benetzungsverhalten, d. h. die Art und Weise, wie sich Flüssigkeiten auf der Oberfläche von Feststoffen verhalten, hängt von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, der Fest-Flüssig-Grenzflächenspannung und der freien Oberflächenenergie des Feststoffs ab. Der Kontaktwinkel eines Flüssigkeitstropfens auf einer festen Oberfläche (Abb. 7a) hängt von diesen thermodynamischen Variablen ab. Er ist daher ein direktes Maß für die Benetzbarkeit einer idealen Oberfläche durch eine bestimmte Flüssigkeit. Benetzende Flüssigkeiten bilden einen Kontaktwinkel Θ von weniger als 90° , nicht benetzende einen von mehr als 90° . Aber auch die Oberflächenchemie und die Oberflächentopographie im Mikro- und Nanomaßstab haben einen großen Einfluss auf die Benetzung realer Oberflächen. Sie sind entscheidend dafür, ob sich ein Flüssigkeitstropfen auf einer Oberfläche im Wenzel-Zustand oder im Cassie-Baxter-Zustand befindet.

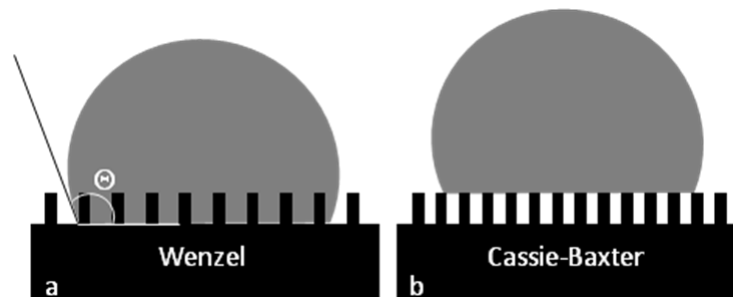


Abb. 7 Schematisch dargestellte Benetzungsmodelle; a: Wenzel; b Cassie-Baxter, Kontaktwinkel Θ . Im Wenzel-Zustand haften Tropfen stark an der Oberfläche

Nach dem Wenzel-Modell vergrößert die Rauigkeit die Gesamtfläche einer festen Oberfläche, wodurch sich auch deren Benetzungseigenschaften verändern (Wenzel 1949). Im idealisierten Wenzel-Regime (Abb. 7a) dringt die Flüssigkeit in alle Unebenheiten der Oberflächenstruktur ein und bedeckt die raue Oberfläche vollständig ohne Lufteinschlüsse. Im Wenzel-Zustand haften Tropfen stark an der Oberfläche, so dass deren Fähigkeit, eine Flüssigkeit abzustößen, stark verringert wird oder vollständig verloren geht. Im Wenzel-Zustand kann die Bewegung eines Tropfens auf einer solchen Oberfläche

behindert werden, obwohl der Kontaktwinkel größer als 90° ist. Inspiriert von biologischen Bindungssystemen berichten Cheng et al. (2010) über Polystyroloberflächen, die sowohl Kontaktwinkel größer als 150° als auch eine hohe Adhäsion für Wasser aufweisen. Mit zunehmender Rauigkeit ändert sich das System vom Wenzel-Regime zum Cassie-Baxter-Regime, d. h. der Luftanteil in der Grenzfläche nimmt signifikant zu. Ein heterogen benetzender Tropfen (Abb. 7b) liegt nur auf den Erhöhungen der Oberflächenstruktur auf. Die Hydrophobie der Oberfläche wird dann verstärkt, da der Tropfen teilweise auf Luftpolstern sitzt, die zwischen Oberfläche und Flüssigkeit eingeschlossen sind (Stenzel und Rehfeld, 2013).

Guo et al. (2015) untersuchten die Benetzbarkeit und das Adhäsionsverhalten der natürlichen Zellwand einer Bienenwabe für Wasser- und Honigtropfen. Auf ESEM-Bildern mit hoher Vergrößerung konnten sie auf der Oberfläche von Zellwänden Ausstülpungen im Nanomaßstab von 200 bis 500 nm und Falten im Mikromaßstab von 0,5 bis 2 μm nachweisen. Ähnliche Strukturen zeigen die Fotografien von Espolov et al. (2014). Guo et al. (2015) experimentierten mit Wasser- und Honigtropfen mit einem Volumen von 10 μl . Der Kontaktwinkel von Wasser betrug $\alpha = 108,4 \pm 5,81^\circ$, der für Honig $\alpha = 130,6 \pm 1,51^\circ$. Die natürliche Wabenzellwand ist daher sowohl für Wasser als auch für Honig hydrophob ($\alpha > 90^\circ$). Sie fanden jedoch, dass sowohl Wasser- als auch Honigtropfen an der Oberfläche haften bleiben, selbst wenn die Zellwand um 180° gedreht wird und die Tropfen nach unten hängen.

Die adhäsiven Eigenschaften der hydrophoben Zellwände für Honig beruhen auf ihrer Oberflächentopographie im Mikro- und Nanomaßstab. Die Rauigkeit ist gerade so, dass Wasser und Honig in die Vertiefungen der Oberflächenstruktur eindringen und die Oberfläche der Zellwand ohne Lufteinschluss vollständig benetzen (Schäfle 2002). Der Kontaktzustand eines Wasser- oder Honigtropfens an der strukturierten Zellwand ist daher immer ein Wenzel-Zustand mit einer hohen Haftung zwischen dem Tropfen und der Zellwand.

Die maximalen Adhäsionskräfte für die Wasser- und Honigtropfen betragen 201,6 μN bzw. 157,8 μN (Guo et al. 2015). Das übertrifft das Gewicht von 100 μN eines Wassertropfens oder 140 μN eines Honigtropfens mit einem Volumen von 10 μl .

Ob ein Wenzel-Zustand vorliegt, hängt auch von der Oberflächenchemie ab (Stenzel und Rehfeld 2013). Bienenwachs besteht zu 12 % aus freien Säuren und enthält 1 % freie Alkohole (Tulloch 1980), die die mechanischen und strukturellen Eigenschaften von Bienenwachs beeinflussen (Buchwald et al.

2009). Freie Fettsäuren und Alkohole (Callow 1963) könnten durch ihre Carboxyl- oder Hydroxylgruppen Wasserstoffbrücken zu Wasser und Honig bilden und so zu deren Adhäsion an der Zelloberfläche beitragen. Es kann angenommen werden, dass diese polaren Gruppen in der unpolaren Matrix zur Oberfläche hin ausgerichtet sind.

In unserem Fall sind drei Hauptfaktoren wirksam, um den Honig in der Zelle zu halten: die Adhäsionskräfte zwischen Honig und Zellwand, der kleine Durchmesser der Zelle und die Oberflächenspannung des Honigs. Die aus der Kombination dieser Faktoren resultierenden Kräfte verhindern das Herausfließen des Honigs, das einen Unterdruck am Zellboden erzeugen würde. Dies zeigt, dass auch der Kapillardruck hilft, den Honig gegen die Gravitationskraft in der Zelle zu halten.

In unserem Experiment mit Wassertropfen, die wir in die nach oben gerichteten Zellen pipettierten, stellten wir fest, dass die Tropfen an ihrem ursprünglichen Platz in der Wabenzelle blieben, wenn die Öffnung der Zelle danach nach unten gedreht wurde. Dieses Verhalten der Tropfen wird durch die Tatsache unterstützt, dass der in der 120°-Ecke der Wabenzelle platzierte Tropfen eine etwa doppelt so große Kontaktfläche aufweist, wie die auf einer flachen Zellwand platzierten Tropfen bei Guo et al. (2015). Die Kontaktfläche und damit auch die Adhäsionskraft ist noch größer, wenn Bienen Honigtröpfchen in der aus drei Rhomben bestehenden Bodenspitze ablagern.

An dieser Stelle möchten wir zwei interessante Aspekte im Zusammenhang mit der Honigernte erwähnen. Vor dem Schleudern des Honigs können Imker die Reife des Honigs in nicht verdeckelten Zellen durch die „Spritzprobe“ überprüfen. Wenn der Honig reif ist, ist seine Oberflächenspannung so hoch, dass trotz starken Abwärtsschüttelns einer horizontal gehaltenen Wabe kein Honig heraustropft.

Später, nach dem Schleudern, haftet trotz der hohen Zentrifugalkräfte während des Schleuderprozesses noch restlicher Honig an den Zelloberflächen. Hier verhindert die Adhäsion an den Zellwänden, dass der Honig vollständig aus den Waben geschleudert wird.

b. Zellorientierung bei Waben, die unter besonderen Bedingungen gebaut wurden

Eine Aufwärtsneigung der Zellen, die sich nicht direkt an der Decke der Nisthöhle befinden, wird bei Waben von *Apis mellifera* immer beobachtet. Wir nehmen daher an, dass diese Aufwärtsneigung eine Bedeutung hat. Wir haben gezeigt, dass ihr Zweck nicht darin besteht, das Auslaufen von Honig zu verhindern und sie auch keine Voraussetzung für die Aufzucht der Brut ist.

Was ist dann der Sinn?

Wenn Bienen Waben von oben nach unten bauen, sind die Zellen gegen die Richtung des Baufortschritts nach oben geneigt. Daher war unsere anfängliche Vermutung, dass die Neigung der Zellen gegen die Richtung des Baufortschritts ein allgemeines Prinzip des Wabenbaus sein könnte. Dementsprechend sollten die Zellen nach unten geneigt sein, wenn die Wabe von unten nach oben gebaut wird. Aber in unserem Experiment, bei dem wir die Bienen dazu gebracht haben, eine Wabe von unten nach oben zu bauen, stellten wir fest, dass auch in diesem Fall die Zellen nach oben geneigt waren, genau so, als ob die Wabe von oben nach unten gebaut worden wäre (Abb. 4 und Abb. 5). Wenn wir fragen, welcher Parameter beim Bauen von oben nach unten und umgekehrt gleich bleibt, dann ist dies die Richtung der Gravitation. Das deutet darauf hin, dass die Neigung der Zellen nicht von der Baurichtung abhängt, sondern offensichtlich von der Richtung der Schwerkraft. Dies steht im Einklang mit Martin und Lindauer (1966), die fanden, dass die Bienen beim Wabenbau mit dem Nackenorgan die Ausrichtung der Wabenkomponenten im Schwerkräftfeld steuern.

Bei der Verwendung von Mittelwänden kann man beobachten, dass die Bienen gleichzeitig auf größeren und entfernten Bereichen Zellen ausbauen. Wir nehmen an, dass Bautrupps, die in einiger Entfernung voneinander oder auf verschiedenen Seiten der Mittelwand Zellen ausbauen, keine Informationen über die Konstruktion ihrer Zellen austauschen. Auf der fertigen Wabe sind jedoch alle Zellen einheitlich nach oben geneigt. Alle Bienen scheinen den gleichen Plan zu haben, nämlich nach oben geneigte Zellen zu bauen. Wenn Mittelwände verwendet werden, gibt es keine definierte Baurichtung von oben nach unten oder umgekehrt, wie dies beim Bau von natürlichen Waben der Fall ist. Deswegen ist auch hier anzunehmen, dass die Schwerkraft der bestimmende Faktor für die gemeinsame Ausrichtung der Neigung der Zellen ist.

Während einer Space-Shuttle-Mission bauten Bienen unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit (etwa 10^{-4} g in verschiedenen, aber unbekanntem Richtungen, g = Erdbeschleunigung) Waben mit Zellen normaler Größe. Im Vergleich zu auf der Erde gebauten Waben waren die Wabenzellen jedoch nicht durchgehend nach oben / unten geneigt (in eine Richtung). Das ist nicht überraschend, da bei Schwerelosigkeit für eine Honigbiene keine offensichtliche „Abwärtsbewegung“ auftritt (Vandenberg et al. 1985). Während der STS-41C-Mission von Spacelab produzierten Bienen mehrere Wabenstücke. Bei zwei der Orbiter-Wabenstücke waren die Zellen auf jeder Seite in die gleiche Richtung geneigt. Für das größere Stück waren die Zellen

auf einer Seite nach oben in Richtung Lexas gewinkelt, während die Zellen auf der anderen Seite nach unten zum Boden des Bee Enclosure Module (BEM) geneigt waren. Die „nach oben“ gewinkelten Zellen hatten einen höheren Durchschnittswinkel als die „nach unten“ gewinkelten Zellen. Die Begriffe „oben“ und „unten“ sind in der Schwerelosigkeit nur in Bezug auf das BEM von Bedeutung. Ein anderes Stück, das anscheinend vom BEM-Boden aus gebaut worden war, zeigte einen weiten Winkelbereich (Poskevich, 1984). Auch hier ist zu erkennen, dass die Neigung der Zellen ein intrinsisches Phänomen beim Wabenbau ist. Unter Schwerelosigkeit ist die Funktion des Nackenorgans, mit dem die Bienen beim Wabenbau die Ausrichtung der Wabenkomponenten im Schwerkräftfeld steuern (Martin und Lindauer 1966), außer Funktion. Daher gibt es unter diesen Bedingungen keine einheitliche Vorzugsrichtung für die Neigung der Zellen und offenbar auch kein Maß für die Größe des Neigungswinkels. Die Neigung der Zellen tritt jedoch unter allen äußeren Umständen auf und es wird deutlich, dass die Schwerkraft auf der Erde für die bekannte Ausrichtung des Neigungswinkels der Wabenzellen entscheidend ist.

c. Die Neigung der Zellen nach oben erhöht die Tragfähigkeit der Wabe

Da die Neigungsrichtung der Zellen durch die Schwerkraft gesteuert wird, ist es naheliegend anzunehmen, dass die Neigung etwas mit der Wirkung der Schwerkraft zu tun hat. Unsere Hypothese ist daher, dass sie die Tragfähigkeit der Wabe erhöht, wie in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt.

In Abbildung 8 zeigen wir die Zerlegung der durch die Gravitation bedingten Gewichtskraft F_g in die Komponenten F_W parallel und F_T senkrecht zur Zellwand. Wir sehen, dass aufgrund der Neigung um 13° eine Komponente F_W des Gewichts F_g jeder Zelle (gefüllt mit Honig) auf die Mittelwand gerichtet ist.

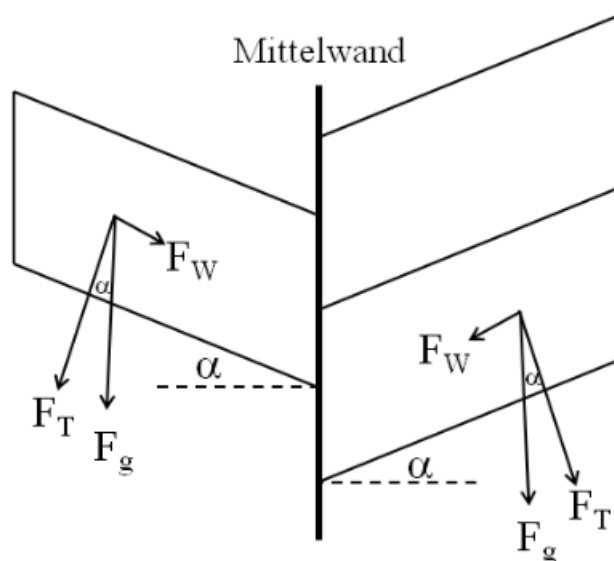


Abb. 8 Schematische Darstellung eines vertikalen Schnitts durch eine Wabe mit um einen Winkel α nach oben geneigten Zellen auf beiden Seiten der Mittelwand und der Zerlegung der Gewichtskraft F_g in die Komponenten F_W und F_T parallel und senkrecht zur Zellwand

Die Komponente F_W könnte zu einer Biegung der Mittelwand führen, z.B. wenn die Zellen auf beiden Seiten der Mittelwand nicht gleichmäßig lang oder nicht gleichmäßig gefüllt sind. Wenn diese Symmetrie jedoch gegeben ist, wird die von der Komponente F_W auf einer Seite ausgeübte Kraft durch die entsprechende Kraft auf der gegenüberliegenden Seite kompensiert (Abb. 8). Mit der Kraft $F_g = m * g$ mit der Honigmasse m , der Erdbeschleunigung g und dem Aufwärtsneigungswinkel α ergibt sich $F_W = m * g * \sin \alpha$ und mit $\alpha = 13^\circ$: $F_W / F_g = \sin \alpha = 0,225$. Bei einem Neigungswinkel von 13° wird bei diesem Ansatz ein Bruchteil von ca. 22 % des Gesamtgewichts F_g auf die Mittelwand geleitet.

Die größere Komponente F_T von F_g übt auf das Zellenensemble ein Drehmoment $T = D / 2 * m * g * \cos \alpha$ aus, wobei D die Tiefe der Zellen ist. Auch das Drehmoment wird durch die Neigung der Zellen verringert.

Mit den Kräften F_W , die auf beide Seiten der Mittelwand wirken, können wir ein zweites Kräfteparallelogramm erstellen. Daraus können wir die resultierende Kraft F_{MW} in Richtung der Schwerkraft ableiten, die auf die Mittelwand übertragen wird (Abb. 9). Mit $\frac{1}{2} * F_{MW} / F_W = \sin \alpha$ und $F_W = F_g * \sin \alpha$ erhalten wir $F_{MW} = 0,1 * F_g$. Infolge der Neigung der Zellen werden 10 % der Last in den Zellen von der Mittelwand absorbiert. Als das einzige Strukturelement einer Wabe, das in Richtung der Schwerkraft ausgerichtet ist, kann sie die Gravitationskräfte am besten aufnehmen. Die Mittelwand ist auch dicker als die Zellwände.

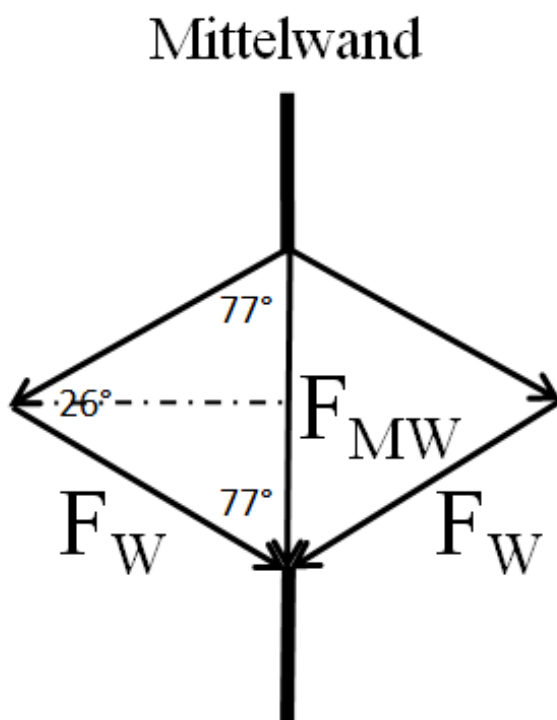


Abb. 9 Parallelogramm der Kräfte F_W aus Abb. 8, die auf die Mittelwand einwirken (die oberen Linien sind Hilfslinien zur Vervollständigung des Parallelogramms). Die resultierende Kraft F_{MW} ist entlang der Mittelwand nach unten gerichtet. Daraus kann abgeleitet werden, dass infolge der Aufwärtsneigung der Zellen 10 % der Last in den Zellen auf die dickere Mittelwand übertragen werden

Die Bedeutung einer hohen Tragfähigkeit der Waben für die Bienen wird klar, wenn man bedenkt, dass die Höhe von natürlichen Nisthöhlen drei Meter überschreiten kann und dass das Nest im Hohlraum typischerweise die gleiche Form und Größe besitzt (Seeley und Morse 1976).

Zusammenfassend stellen wir fest, dass der Zweck der Aufwärtsneigung der Wabenzellen nicht darin besteht, das Auslaufen von Honig zu verhindern. Sie ist auch keine Voraussetzung für die Aufzucht der Brut. Wir glauben, dass der Nutzen der Neigung der Zellen hauptsächlich darin besteht, einen erheblichen Teil der Gravitationskräfte des Zellinhalts auf die Mittelwand zu lenken und damit die Gesamttragfähigkeit der Wabe zu erhöhen. Da ein größerer Neigungswinkel die Höhe der Zelle und damit das Zellvolumen und den Platz für die Brut verringern würde, muss der Neigungswinkel begrenzt sein. Die Bienen haben für die Neigung einen Wert von ca. 13° gewählt. In dieser Hinsicht berücksichtigen die Bienen die Größe und Körperform von Arbeiterinnen- und Drohnenpuppen, verwenden jedoch nicht ihren eigenen Körper als Schablone beim Bau der Zellen (Oeder und Schwabe 2017a, b).

Honigbienen bauen Waben mit minimalem Wachsverbrauch und maximaler Festigkeit und Kapazität. Die Mehrzweckverwendung der Waben umfasst das Aufziehen der Brut, die Lagerung der Vorräte und über die Schwingungseigenschaften die Kommunikation der Bienen. Der Neigungswinkel von etwa 13° nach oben scheint für die Bienen der beste Kompromiss zwischen der Erhöhung der Tragfähigkeit der Wabe und der Bereitstellung eines an die Anforderungen der Brut angepassten Zellvolumens zu sein.

Danksagung

Wir danken der Justus-Liebig-Universität Gießen für die Zurverfügungstellung von Infrastruktur-Dienstleistungen.

Literatur

Buchwald R., Breed M.D., Bjostad L., Hibbard B.E., Greenverg A.R. (2009) The role of fatty acids in the mechanical properties of beeswax. *Apidologie* 40:585–594

Callow R.K. (1963) Chemical and Biochemical Problems of Beeswax, *Bee World* 44:3, 95-101

Cheng Z., Gao J., Jinag L. (2010) Tip geometry controls adhesive states of superhydrophobic surfaces, *Langmuir* 26 (11), pp 8233–8238

Dietemann V., Lehnerr B., Duvoisin N., Blumer P., Fluri P., Herrmann M.,

- Pratt S. C. (2004) Collective control of the timing and type of comb construction by honey bees (*Apis mellifera*). *Apidologie* 35:193–205
- Schäfle C. (2002) Morphologie, Verdampfung und Kondensation von Flüssigkeiten auf benetzungsstrukturierten Oberflächen. Dissertation, University of Konstanz
- Seeley T. D., Morse R.A. (1976) The nest of the honey bee (*Apis mellifera* L.), *Insects Sociaux* 23/4: 495-512
- Stenzel V., Rehfeld N. (2013) Funktionelle Beschichtungen. Vincentz Network, Hannover, pp. 17-22
- Tautz J. (2008) *The Buzz about Bees - Biology of a Superorganism*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Tautz J. (2012) *Phänomen Honigbiene*. S. 176, Springer Verlag Berlin Heidelberg
- Tulloch A. P. (1980) Beeswax - composition and analysis. *Bee World* Vol.61, No.2, pp.47-62
- Vandenberg J.D., Massie D.R., Shimanuki H., Peterson J.R., Poskevich D.M. (1985) Survival, behavior and comb construction by honey bees, *Apis Mellifera*, in zero gravity aboard as NASA shuttle mission STS 13. *Apidologie* 16(4):369-384
- Vogt H. (1911) *Geometrie und Ökonomie der Bienenzelle*. Trewend und Granier, Breslau, Germany
- Wahyudi I. W. (2018) Structure and production of honey bees maintained in traditional and modern nests in Tenganan village, Karangasem district. *Proceeding Book - International Seminar Bali Hinduism*, ISBN: 978-602-52255-0-5
- Wenzel R. N. (1949) Surface Roughness and Contact Angle. *J. Phys. Chem.* 53 (9):1466-1467

ENTROPIE

Wachsende Bedeutung in Naturwissenschaft und Informationstheorie Eine Übersicht in Beispielen

WILLI KAFITZ*)

Abstract:

Entropy is far more than a thermodynamic way of structuring things, more than a way of theorizing about the beginning of the imminent Industrial Age in order to build better steam engines with the help of natural sciences. Entropy is a fundamental prerequisite for our way of making sense of the world around us and beyond any natural science. It is a way of going forward into a new digital age by way of cross referencing information theory.

In the chronology from past to future, entropy has a fundamental philosophical meaning. The following text is meant to show the variety of paradigms with the help of examples.

Keywords: entropy, information theory, time's arrow, deterministic chaos

Zusammenfassung:

Entropie ist viel mehr als thermodynamische Strukturierungshilfe, viel mehr als ein Theoriebaustein, um im seinerzeit beginnenden Industriezeitalter durch besseres naturwissenschaftliches Verständnis bessere Dampfmaschinen bauen zu können. Entropie ist grundlegend für unser Weltverständnis, für die innere Ordnung der uns begrenzenden Systeme, wie z.B. Festkörper, Flüssigkeiten, Gase und das über die Naturwissenschaft hinaus. Sie begleitet uns insbesondere in das neue digitale Zeitalter über die verblüffenden Querbeziehungen zur Informationstheorie. In der Abfolge der Zeit von Vergangenheit zu Zukunft hat Entropie eine grundlegende, lenkende, die Entwicklungsrichtung vorschreibende wie auch naturphilosophische Bedeutung.

Der vorliegende Beitrag soll anhand von Beispielen die große Bandbreite an Erklärungsmustern für natürliche Abläufe mit Hilfe der Entropie verdeutlichen.

Schlüsselwörter: Entropie, Informationstheorie, Zeitpfeil, deterministisches Chaos

*) Dr. Willi Kafitz, Rother Weg 3, 35112 Fronhausen, email: willikafitz@web.de

Dieser Beitrag erscheint auch in gedruckter Form in der "Oberhessischen Naturwissenschaftlichen Zeitschrift", Volume 68, Gießen 2020

„Ein- oder zweimal habe ich mich provozieren lassen und die Anwesenden gefragt, wie viele von ihnen das zweite Gesetz der Thermodynamik angeben könnten. Man reagierte kühl – man reagierte aber auch negativ. Und doch bedeutete meine Frage auf naturwissenschaftlichem Gebiet etwa dasselbe wie „Haben Sie etwas von Shakespeare gelesen?“^{1,2}

Charles Percy Snow

„In der Natur nimmt die Entropie die Rolle des Direktors ein, die Energie aber nur die eines Buchhalters.“³

Arnold Sommerfeld

„You should call it entropy. [...] Nobody knows what entropy really is, so in a debate you will always have the advantage“⁴

John von Neumann an Claude Shannon

Wenn ich Freunden und Bekannten erklären soll, was Entropie ist, so bemühe ich meist folgende einfache, wenn auch etwas problematische Analogie: *„Stellen Sie sich ein Kinderzimmer vor, in das sich ein Kind für einige Stunden bei geschlossener Tür zum Spielen zurückzieht. Öffnet man nach dieser Zeit die Tür, so wird die Unordnung im Zimmer bestenfalls wie vorher sein. Aber mit großer Wahrscheinlichkeit wird sie steigen.“⁵*

Autor

¹ C.P. Snow, „Die zwei Kulturen. Rede Lecture, 1959“, in Die zwei Kulturen. Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz. C.P. Snows These in der Diskussion, hg. v. Helmut Kreuzer, München 1987, S. 30.

Zitiert nach Richard A. Muller, JETZT – Die Physik der Zeit, deutsche Ausgabe, S. Fischer Verlag 2018, Frankfurt am Main, S. 134.

² Snow-Zitat im größeren Zusammenhang und seine kritische Betrachtung siehe David Oels: Zu einem unpassenden Beispiel in C.P. Snows Zwei Kulturen, https://www.blogs.uni-mainz.de/fb05-sachbuchforschung/files/2015/07/Oels_Zu_Snow_Zwei_Kulturen.pdf

³ Zitiert nach https://www.energieverbraucher.de/de/entropie__2135/

⁴ Zitiert nach Hinrichsen, Hays, Entropie als Informationsmaß, https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030300/_imported/fileadmin/tp3/ThermoEDynamik/Entropie.pdf

⁵ Entropie kann nicht immer mit Unordnung gleichgesetzt werden. Der Begriff „Unordnung“ kann subjektiv unterschiedlich besetzt sein, z.B. hier im Beispiel bei Kind und Eltern. Entropie und insbesondere Entropieänderung sind aber physikalisch wie mathematisch präzise definiert und messbar, also bestimmbar.

Inhalt

Einleitung und Fokus	29
Der Entropiebegriff in der Thermodynamik	29
Entropie in der Chemie	32
Entropie in der Quantenmechanik	34
Entropie in der Informationstheorie	40
Der Zusammenhang von Information und Energie	43
Entropie und Schwarze Löcher	45
Entropische Gravitation	48
Zeitverläufe	50
Deterministisches Chaos	53
Fazit	59
Literaturhinweise	60
Abbildungsnachweise	62
Danksagung	62
Faksimile	63

Einleitung und Fokus

Im Internetzeitalter ist es einfach, sich insbesondere über die ursprüngliche Bedeutung von Entropie, ihren wichtigsten Anwendungsbereich, nämlich in der Thermodynamik und sogar über die mathematische Herleitung und Begründung des Entropiebegriffes zu informieren. Das Ziel des hier vorgelegten Beitrags sollte es deshalb vordringlich eben nicht sein, diese leicht zugänglichen Informationen zu liefern, vielmehr soll vor allem die Vielfalt an verschiedenen Fachgebieten thematisiert werden, in denen der Entropiebegriff oder die hinter diesem Begriff stehenden Ideen heute eine Rolle spielen. Dazu sollten einige sehr allgemeine Grundlagen, insbesondere aus der Thermodynamik, genügen, um für weitergehende Betrachtungen eine Basis zu haben. Bewusst wurde hier von „Fachgebieten“ gesprochen, weil mittlerweile der Entropiebegriff auch in Bereichen außerhalb der Naturwissenschaften verwendet wird. Die entscheidende Erweiterung fand zweifellos in der Informationstheorie statt, so dass man von „mathematisch-naturwissenschaftlichen Fachgebieten“ sprechen kann. Aber auch in anderen Wissenschaftsbereichen wird der Begriff Entropie verwendet. So wird z.B. auch ökonomische Knappheit, oder ökonomischer Wert, in einigen Theorien mit Hilfe des Entropiebegriffes erklärt. Diese Anwendungsbereiche sollen hier nicht thematisiert werden. Eine Sonderstellung soll allerdings die Informationstheorie, auch im Hinblick auf kosmologische Themen, bekommen, die hier als Fachgebiet mit einbezogen werden soll.

Der Entropiebegriff in der Thermodynamik

Es war eine grundlegende Erkenntnis, dass bei allen Prozessen nicht einzelne, wohl aber die Summe aller Energieformen vorher und nachher gleich bleiben. Dies ist das Prinzip der Energieerhaltung oder, daraus abgeleitet, der sogenannte 1. Hauptsatz der Thermodynamik, nach dem die Energie in einem abgeschlossenen System konstant ist⁶.

Es fällt auf, dass neben der Möglichkeit Arbeit zu verrichten in der Regel auch Wärme entsteht: Der Motor wird warm, Reibung erzeugt Wärme und auch die

⁶ Man sollte den Energiebegriff präzise definieren. Hier beispielsweise die Definition von Emmy Noether: „Energie ist die Erhaltungsgröße, die dem Fehlen einer expliziten Zeitabhängigkeit in der Lagrange-Funktion entspricht.“ Zitiert nach Müller, Richard A., Jetzt – Die Physik der Zeit, S. Fischer, Frankfurt a. Main, 2018, S. 136.

Brennstoffzelle oder eine Glühbirne wird leider warm oder gar heiß⁷. Diese Tatsache ist technisch mit dem Begriff „Wirkungsgrad“ verbunden.

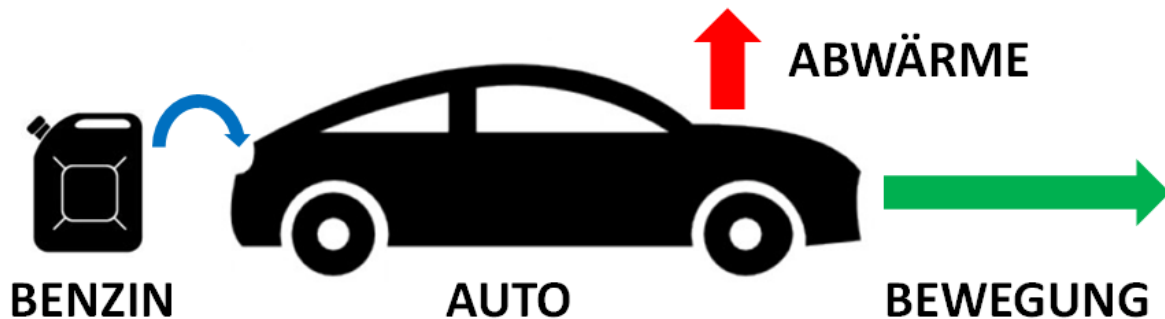


Abb. 1: Einen Wirkungsgrad⁸ von 100% kann es nicht geben. Im Beispiel, das die Abbildung verdeutlichen soll, kann die chemische Energie nicht vollständig in Bewegungsenergie umgewandelt werden (Quelle der Abb. 1: www.gograph.com, de.freepik.com).

Es kann also kein Perpetuum Mobile geben.

In einem geschlossenen System kann zwar keine Energie verloren gehen, aber es ist in der Regel Energie erforderlich, um den ursprünglichen Zustand wieder zu erhalten. Diese Erkenntnisse wurden maßgeblich durch den Begriff der „Entropie“ thematisiert und erlauben quantitative Erkenntnisse, also physikalische Gesetze. Von allen extensiven, von der Größe des Systems abhängigen Variablen der Physik, ist Entropie die einzige nicht direkt messbare Größe. Sie hat die Dimension Joule pro Kelvin. Eine Einsicht lautet: In einem geschlossenen System nimmt die Entropie nie ab, sondern bleibt höchstens gleich oder nimmt bei realen Prozessen in der Regel zu. Entropie ist keine Erhaltungsgröße von Prozessen, aber sie ist wie die Energie eine extensive Zustandsgröße. „Extensiv“ heißt: verdoppelt man die Größe des Systems so verdoppelt sich auch die Energie und die Entropie, im Gegensatz z.B. zu Temperatur oder Druck. Temperatur und Druck nennt man deshalb „intensive Zustandsgrößen“, während Entropie und (Innere) Energie „extensive Zustandsgrößen“ sind, die mit wachsender Größe des Systems ebenfalls größer werden. Die Entropie kann man auch als Maß für die Unordnung in

⁷ Die Beispiele sind nicht äquivalent. Bei Motoren entsteht aus dem chemischen Energieträger Treibstoff neben Bewegungsenergie auch, abgesehen von Heizung, weitgehend unerwünschte Abwärme. Die Glühbirne emittiert dagegen ausschließlich Plancksche Strahlung inkl. infraroter Wärmestrahlung. Die Wärme kann unter Umständen erwünscht sein (Ferkel, Frühchen, Gewächshäuser etc.).

⁸ Als Wirkungsgrad ist hier die Effizienz einer technischen Anlage als Prozentsatz bzgl. Ausnutzung der investierten Energie gemeint.

einem System bezeichnen. Es ist Energie erforderlich, um wieder einen Zustand höherer Ordnung zu erreichen. Damit beschäftigt sich der 2. Hauptsatz der Thermodynamik⁹.

$$S = -k_B \sum_i p_i \ln(p_i)$$

Die Entropie S ergibt sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten p_i und deren natürlichen Logarithmus aller möglichen Mikrozustände i . k_B ist die nach Boltzmann benannte Proportionalitätskonstante. S hat die Einheit Joule durch Kelvin.

Entropie ist somit proportional zum Logarithmus der Anzahl möglicher Zustände.

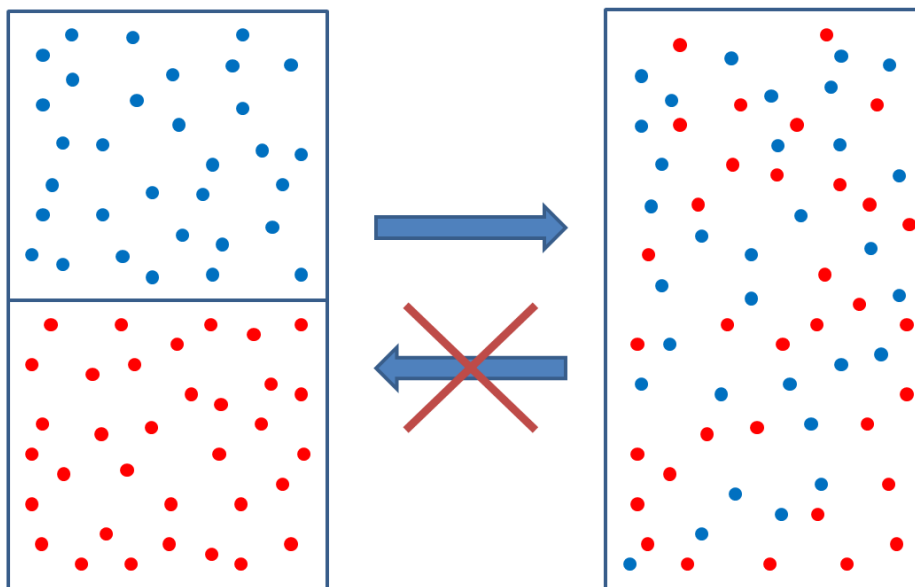


Abb. 2: Vermischung zweier Gase oder Flüssigkeiten als irreversibler Prozess mit einem Endzustand höherer Entropie.

Bei Abbildung 2 soll es sich um ideale Gase handeln, bei denen zwischen den Molekülen keine Anziehungs- oder Abstoßungskräfte wirken. Die Vermischung wird in diesem Fall weder Wärme erzeugen noch verbrauchen. Die Energiebilanz bleibt gleich. Aber die Entropieerhöhung führt zur spontanen

⁹ Als 3. Hauptsatz wird das Postulat von Walther Nernst bezeichnet, dass der absolute Nullpunkt experimentell nicht erreicht werden kann.

Vermischung und macht den Vorgang irreversibel. Fußnote¹⁰ behandelt ein Rechenbeispiel bei der Vermischung von Wasser unterschiedlicher Temperaturen. Auch dieser Prozess ist irreversibel und die Ursache ist die Entropiezunahme.

Entropie in der Chemie

Die Entropie als eine fundamentale thermodynamische Zustandsgröße mit der SI-Einheit¹¹ Joule durch Kelvin spielt in der Chemie und damit auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in der chemischen Verfahrenstechnik eine wichtige Rolle. Allerdings lässt sie sich im Gegensatz zu anderen Zustandsgrößen, wie Volumen oder Temperatur nicht direkt messen. Dabei ist sie eine extensive Größe, d.h. sie ist zur Größe des Systems proportional. Diese Änderungen der Entropie sind für Masse, Stoffmenge oder Volumen noch anschaulich. Für die thermodynamischen Potentiale, wie innere Energie, freie Energie, Enthalpie (früher Wärmehalt) und freie Enthalpie wird es schnell unanschaulich und meist erst in quantitativen Überlegungen beherrschbar. Dabei wird in der Regel versucht, die extensiven Größen in intensive Größen umzuwandeln, indem man sie auf eine bestimmte Masse (spezifische Größe) oder eine bestimmte Stoffmenge (molare Größe) bezieht. So ist zwar das Volumen eine extensive Größe, das molare Volumen stellt im Gegensatz hierzu jedoch eine intensive Größe dar. Im chemischen Rechnen spielt das Mol¹², also die SI-Einheit der Stoffmenge in Gramm des Molekular- oder Atomgewichtes, eine wesentliche Rolle. Sie enthält immer die gleiche Teilchenanzahl eines reinen Stoffes („Avogadro-Konstante“). Sie dient unter anderem der Mengenangabe bei chemischen Reaktionen, kann aber auch in anderem physikalischen Zusammenhang verwendet werden (z.B. Elektronen). Stoffmenge und Teilchenzahl sind dabei direkt proportional und können als Maß für jeweils die andere Größe dienen.

Die Entropie S hat die Einheit der Energie Joule dividiert durch die Einheit der Temperatur Kelvin. Sie gewichtet also thermodynamisch durch die reziproke absolute Temperatur die zu- oder abgeführte Wärme; statistisch beschreibt sie

¹⁰ Ein Kilogramm Wasser besitzt bei 10 °C die Entropie $S = 151 \text{ J/K}$, bei 20 °C $S = 297 \text{ J/K}$, bei 30 °C $S = 437 \text{ J/K}$. 1 kg kaltes Wasser (10 °C) und 1 kg warmes Wasser (30 °C) können bei Berührung spontan in den Zustand 2 kg lauwarmes Wasser (20 °C) übergehen, weil die Entropie des Anfangszustandes ($151 + 437 = 588$) kleiner ist als die Entropie des Endzustandes ($297 + 297 = 594$).

¹¹ französisch „Système international d'unités“

¹² Ein Mol eines Stoffes enthält definitionsgemäß genau $6.02214076 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadro-Konstante).

die Zahl der Mikrozustände, z.B. genormt durch das Mol als Einheit, in dem beobachteten Makrozustand.

Vergleichsweise selten stellen sich Fragen, die sich alleine auf Entropieänderungen ΔS bei chemischen Reaktionen beziehen. Beispiele dafür sind:

fester Stoff (s) gelöst in Flüssigkeit (l) $\rightarrow \Delta S > 0$

Gas (g) gelöst in Flüssigkeit (l) $\rightarrow \Delta S < 0$

Auch wenn die Teilchenzahl kleiner wird, ist dies mit einer geringeren Entropie verbunden:

$2 \text{CO}_{(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2 \text{CO}_{2(g)}$ hat zur Folge $\Delta S < 0$ ¹³

Es sind meist Fragen im Zusammenhang mit anderen Zustandsgrößen, wie Enthalpie (H), freie Reaktionsenthalpie (G), Volumen (V), Druck (P), Temperatur (T) etc. und Fragen nach dem Reaktionsverlauf und der Reaktionskinetik (exotherm, endotherm, exergon, endergon¹⁴, etc.), die in der Summe Aussagen zu einer chemischen Reaktion erlauben.

So läuft die Knallgasreaktion

$2 \text{H}_{2(g)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}_{(l)}$

spontan ab, obwohl die Ordnung im System zunimmt. Hier ist ΔH so stark negativ, dass es die freie Reaktionsenthalpie ΔG und die Entropieabnahme ΔS mehr als ausgleicht.

¹³ (s)=solid, (l)=liquid, (g)=gas

¹⁴ Begriffsdefinitionen siehe wikipedia.org: Z.B. ist eine chemische Reaktion exotherm, wenn sie mehr Energie freisetzt, als ihr zunächst als Aktivierungsenergie zugeführt wurde. Die Produkte einer exothermen Reaktion haben eine geringere Enthalpie als die Ausgangsstoffe; die Reaktionsenthalpie einer exothermen Reaktion ist also negativ.

Chemische Reaktionen werden in Bezug darauf, ob die freie Enthalpie G der an der Reaktion R beteiligten Komponenten ab- oder zunimmt, als exergone oder endergone Reaktionen bezeichnet:

exergon: $\Delta_R G < 0$

endergon: $\Delta_R G > 0$

Die Enthalpie, früher auch Wärmeinhalt, eines thermodynamischen Systems ist die Summe aus der inneren Energie des Systems und dem Produkt aus Druck und Volumen des Systems: Sie hat die Dimension der Energie und wird in der Einheit Joule gemessen.

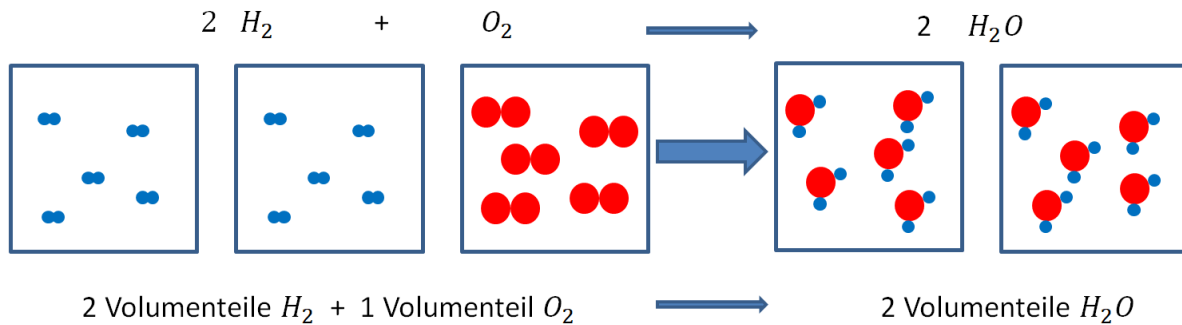


Abb. 3: Erst das Zusammenspiel mehrerer Zustandsgrößen und ihr jeweiliger quantitativer Beitrag erlaubt Aussagen über den Reaktionsverlauf.

Die Entropie spielt also eine wichtige Rolle in der Chemie, aber immer im Zusammenhang zu anderen Zustandsgrößen und Rahmenbedingungen.

Entropie in der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik entstand durch viele Implikationen aus der Thermodynamik. Dies gilt auch für den Beginn der Quantenmechanik durch die Untersuchungen der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck. Die Entropiedichte dieser Hohlraumstrahlung leitet sich direkt aus ihrer Photonendichte ab¹⁵. Er musste im Widerspruch zur klassischen Physik gequantelte Energiezustände, genannt Quanten, annehmen und eine neue Naturkonstante h einführen, die jetzt seinen Namen trägt. Erst der indische Physiker Bose hat Plancks Formel ohne Rückgriff auf die klassische Physik abgeleitet.

Die roten und blauen Kugeln in Abbildung 2 sollen Moleküle oder Atome von unterschiedlichen Gasen oder Flüssigkeiten symbolisieren, die unter gleichen Druck- und Temperaturbedingungen sich zunächst in getrennten Behältern befinden. Entfernt man die Zwischenwand, so durchmischen sich die Gase und es entsteht ein Zustand höherer Entropie. Enthalten beide Behälter gleiche Gase, so sollte kein Entropieanstieg vorliegen. Die Trennwand kann jederzeit wieder eingezogen werden. Makroskopisch gelten die klassischen thermodynamischen Überlegungen. Mikroskopisch mischen sich aber die Moleküle individuell und es würden deshalb unabhängig, ob es verschiedene oder gleiche Gase sind, mehr Mikrozustände geben und damit eine

¹⁵ Man kann folgern, dass Lichtmenge nach Planck einerseits und Entropiemenge nach Clausius andererseits ein Maß für dieselbe Größe ist. Ein thermisches Gleichgewicht zwischen zwei Körpern stellt sich sowohl durch thermischen Kontakt als auch durch Wärmestrahlung ein. Man müsste deshalb nicht physikalisch zwischen Entropie- und „Lichtteilchenstrom“ unterscheiden. Bei „Wärmeleitung“ ist der Entropiestrom äquivalent zu einem „Lichtteilchenstrom“.

Entropiezunahme bei der Vermischung – im Widerspruch zur Thermodynamik und zum Experiment.

Unter dem Gesichtspunkt, der nur die Anzahl an unterschiedlichen Mikrozuständen zählt, führen also Entropiebetrachtungen bei der Vermischung der Gase zum Widerspruch, wenn es sich um gleiche Gase unter gleichen Bedingungen in den beiden Behältern handelt. Hier braucht man einen Korrekturfaktor, der nach Josiah Willard Gibbs benannt wurde, dem dies zum ersten Mal aufgefallen ist. Er beträgt

$\frac{1}{N!}$ N ist die Teilchenzahl und das Symbol „!“ bezeichnet die Fakultätsfunktion, wobei $N! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot N$ bedeuten soll.

$N!$ ist die Anzahl an Permutationen von N Objekten ohne Wiederholung¹⁶. Die Fakultätsfunktion kommt oft in der Wahrscheinlichkeitsrechnung vor. Der Faktor $\frac{1}{N!}$ bewirkt also, dass bei der Anzahl an Mikrozuständen die ununterscheidbaren Zustände nicht einzeln mitgezählt werden sollen. Er muss in allen Bereichen der statistischen Mechanik angewendet werden, damit die experimentellen Ergebnisse erklärt werden können. Das ist die heuristische Begründung, unabhängig von klassischer oder quantenmechanischer Sichtweise.

Bezogen auf die Entropie mündet sowohl die heuristische Argumentation über den Gibbsschen Korrekturfaktor, als auch die streng mathematische Herleitung in das Ununterscheidbarkeitspostulat bei Einzelteilchenbetrachtungen, um Experiment und mathematische Beschreibung in Einklang zu bringen. Es besagt, dass Teilchenpermutationen gleicher Teilchen immer auf einen Zustand führen, der physikalisch ununterscheidbar vom ursprünglichen Zustand ist. Eine Messung kann beide Zustände nicht unterscheiden¹⁷.

Auf der Mikroebene sollte man ununterscheidbare Objekte etwas genauer beleuchten. Was macht die Ununterscheidbarkeit aus?

Misst man z.B. bei einzelnen Molekülen, Atomen, Elektronen, Neutronen oder Protonen die Masse oder die Ladung, so wird man immer exakt die gleichen Werte erhalten. Darüber hinaus kann man jedes Quantenobjekt durch einen Satz an „Quantenzahlen“ beschreiben. Dies sind Angaben über eindeutig

¹⁶ Beispiel jeweils 10 Teilchen in jedem Behälter: Anzahl Permutationen bei 10: $10! = 3628800$; bei 20 wären es: $20! = 2432902008176640000$

¹⁷ Mathematisch wird dies über die algebraische Permutationsgruppe aus N Elementen deutlich. Sie hat die Dimension $N!$ und ist für $N > 2$ nicht-abelsch. Dabei gibt es eine kommutative Beziehung zwischen Messobservable und Permutationsoperator, die zur Ununterscheidbarkeit führt.

messbare, kommensurable Zustände eines Quantenobjektes. D.h. sie müssen unabhängig voneinander beliebig genau gemessen werden können¹⁸. Quanten mit gleichen „Quantenzahlen“, von denen allein ein im Atom gebundenes Elektron mehrere besitzt, sind absolut gleich. Sie beschreiben die Eigenzustände und zwar äquivalent als Zustandsvektor oder in Form einer Wellengleichung („Schrödinger-Gleichung“). Dabei gibt es durchaus Differenzierungen, z.B. zwischen zwei Elektronen. So besitzt ein Heliumatom zwei Elektronen. Sie besetzen die unterste „Schale“ („K-Schale“), das sogenannte s-Orbital. Sie unterscheiden sich aber im Spin, einer Art Drehimpuls. Dabei ist eines „rechtsdrehend“ und das andere „linksdrehend“, aber der absolute Wert des Spins ist immer gleich, nämlich $\pm \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. h ist das eingangs genannte Plancksche Wirkungsquantum. Die Spinquantenzahl ist definiert als $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ (ohne $\frac{h}{2\pi} := \hbar$, gesprochen h quer) und repräsentiert den oben genannten Messwert. Dies reicht jedoch nicht, um den beiden Elektronen eine Individualität zuzusprechen. Schließlich sind auch alle Heliumatome mit ihrem Kern aus zwei Protonen und (zu 99,9998%) zwei Neutronen sowie der beiden Elektronen in der Elektronenhülle ununterscheidbar. Im Gegenteil, in einem Atom müssen sich zwei Elektronen mindestens bei einer Quantenzahl unterscheiden, da die Besetzung sowohl des Spins als auch der höheren Schalen/Orbitale einer gewissen Reihenfolge unterliegt („Paulisches Ausschließungsprinzip“). Der Grundzustand ist immer der energetisch günstigste Zustand. Doch auch da gibt es keinen individuellen Spielraum für die Teilchen. Wird ein Elektron angeregt und besetzt eine höherliegende Schale, so ist immer ein exakt gleicher Energiebetrag nötig, der auch wieder in Form von Photonen, also Strahlung einer wohldefinierten Frequenz, emittiert wird, wenn das Elektron den Anregungszustand wieder verlässt. Auch dabei sind die Messwerte immer gleich. Es gilt: Quantenobjekte, die man unter gleichen Rahmenbedingungen untersucht, sind ununterscheidbar.

Wenn es um die Quantenmechanik von Mehr-Teilchen-Systemen geht, auch von gleichartigen Teilchen, muss man sich zunächst die grundsätzlichen Anwendungsbereiche von Thermodynamik und Quantenmechanik vor Augen halten. Die nächsten Zeilen sollen das in verkürzter, prinzipieller Form leisten und die wesentlichen Unterschiede erkennen lassen.

¹⁸ Das Gegenteil ist inkommensurabel oder komplementär. Die Möglichkeiten ihrer Bestimmung werden durch die (erweiterte) Heisenbergsche Unschärferelation abgeschätzt. Seien A und B komplementär, so ist $\Delta A \cdot \Delta B \sim h$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist.

Die Thermodynamik beschreibt die Zustände zwischen Systemen in Bezug auf die makroskopischen Variablen Temperatur-, Druck- und Volumenänderung und die Zusammenhänge zwischen diesen drei Variablen. Je nachdem wie man eine oder mehrere Variable ändert, kann man Reaktionen des Systems auf der makroskopischen Ebene messen. Über die Messergebnisse lassen sich Zustandsgleichungen ermitteln und damit Zusammenhänge zwischen den Variablen darstellen. Insbesondere Temperatur und Druck stellen einen Mittelwert dar. Sie ordnen Makrozuständen, gemittelt über viele Mikrostände, einen Wert zu (bei der Temperatur genannt Grad Kelvin). Des Weiteren ist schon aus historischen Gründen die Umwandlung von Wärme z.B. in elektrische Energie oder Arbeit (oder umgekehrt) Thema der Thermodynamik. In der Thermochemie geht es insbesondere um thermische und chemische Energie, wie diese zusammenhängen und wie diese Energieformen ineinander umgewandelt werden können. Bei allen diesen Bereichen handelt es sich um makroskopische Problemstellungen, die eine große Summe an mikroskopischen Zuständen umfassen, aber deren Moleküle oder Atome in den mikroskopischen Zuständen nur mittelbar interessieren. Die Entropie ist dabei nicht direkt messbar, wohl aber indirekt genau bestimmbar.

Die Quantenmechanik ist eine Theorie, die die gesamte Materie und Strahlung im Fokus hat und das theoretisch auch auf allen Skalen. Sie zielt auf eine Beschreibung der Welt als Ganzes mit all ihren heutigen physikalischen Gesetzen. Doch dieser allumfassende Ansatz stößt in der Praxis an Grenzen. Gleichungen, die über einfache Systeme hinausgehen, lassen sich schon nicht mehr genau lösen. Eine „Quantisierung“ wichtiger „klassischer“ Theorien, wie der allgemeinen Relativitätstheorie, ist noch nicht gelungen. Physikalische Fragen müssen also auch weiterhin mit Gesetzen erklärt werden, die dem jeweiligen Skalenbereich angemessen sind.

Trotzdem hat die Quantenmechanik oder Quantentheorie Anfang des letzten Jahrhunderts eine Revolution in der Physik und später in der Technik ausgelöst und hat immer mehr Erkenntnisse über die kleinsten Teilchen und ihren Wechselwirkungen offenbart. Ihre Stärke liegt also Stand heute vor allem bei der Erklärung einzelner Quanten, wie Elektronen, Protonen und Neutronen, ihrem Verhalten in einzelnen Systemen, wie Atomen und Molekülen, sowie ihren Wechselwirkungen.

Dabei zeigt sich, dass man über die klassische Physik mit der mathematischen Beschreibung makroskopischer Systeme hinausgehen muss. Die Teilsysteme¹⁹ (Elementarteilchen, Atome, Moleküle, etc.) sind nicht

¹⁹ Das Kapitel Entropie in der Quantenmechanik und insbesondere die folgenden Abschnitte wurden stark geprägt von Friebe, Cord, Kuhlmann, Meinard, Lyre, Holger, Näger, Paul, Passon, Oliver, Stöckler, Philosophie der Quantenphysik, Springer

unabhängig; sie korrelieren. Das muss nicht mit einer Energiedifferenz ΔE für eines der Teilsysteme verbunden sein. Aber die Wechselwirkung ist Kräften unterworfen, die nur quantenmechanisch erklärbar sind. Die Kräfte werden durch Austauschteilchen („Bosonen“) vermittelt.

Es sei hier schon erwähnt, dass in den letzten Jahrzehnten die Quantentheorie auch Basis vieler Forschungen in Astronomie und Kosmologie wurde²⁰.

Die Konsequenzen der Abgrenzung zwischen den Erklärungsschwerpunkten der Thermodynamik und der Quantenmechanik sollen hier kurz skizziert werden, weil damit ein wichtiges Phänomen auf der Quantenebene erläutert werden kann. Der Entropiebezug zeigt sich dann auf den 2. Blick.

In der klassischen Physik bewegt sich ein Teilchen lediglich in einem Zustandsraum mit 3 Orts- und drei Impulskoordinaten (\mathbb{R}^6). Bei N Teilchen wächst die Dimension des Zustandsraumes und stellt z.B. im Fall N=2 einfach die Menge aller geordneten Paare dar. Die physikalische Interpretation bedeutet, dass alle Teilsysteme unabhängig voneinander sind bzw. mathematisch unabhängig behandelt werden können. Wieviel Bewegungsenergie in innere Energie umgewandelt wird, ist das Maß an klassischer Wechselwirkung zwischen den Teilchen. Zumindest bei einem idealen Gas kann man sich auf elastische Stöße zwischen den Molekülen konzentrieren. Es geht dabei immer um makroskopisch messbare Effekte.

Bei der elektromagnetischen Wechselwirkung in ihrer quantenmechanischen Beschreibung bewirkt der Austausch von Photonen z.B. die abstoßende Kraft zwischen zwei Elektronen. Eine sehr einsichtige Darstellung sind sogenannte Feynman-Diagramme (siehe Abb. 4, die Zeitachse läuft von unten nach oben. Die Wechselwirkung wird durch Austausch eines virtuellen Photons γ vermittelt.) Die mathematische Beschreibung muss dies berücksichtigen bzw. offenbart erst die Gesetze in der physikalischen Realität auf der Quantenebene^{21,22}. Die Korrelationen müssen sich in den mathematischen

Spektrum, Heidelberg 2015, S. 79 ff. Die folgende Anmerkung ist vor allem in der mathematischen Notation fast wörtlich übernommen, entspricht aber der üblichen Konvention.

²⁰ Eine quantenmechanisch motivierte Entropiedefinition müsste berücksichtigen, dass Mengengrößen wie Stoff und Ladung, grundsätzlich quantisiert auftreten. Die Planckschen Erkenntnisse zeigen, dass die Photonendichte der Hohlraumstrahlung direkt proportional zu ihrer Entropiedichte ist und als Produkt mit der Boltzmann-Konstante die thermodynamisch begründete Entropie ergibt. Man könnte daraus den Schluss ziehen, dass Photonen die „Entropiequanten“ sind.

²¹ Die mathematische Beschreibung muss wegen Korrelationen über das Tensorprodukt ihrer Hilberträume gehen. Es seien $\{\vec{e}_i\}$ und $\{\vec{h}_j\}$ Basissysteme zweier n- und m-dimensionaler Hilberträume \mathcal{H}_n und \mathcal{H}_m . Mit $\mathcal{H}_n \otimes \mathcal{H}_m$ bezeichnet man das

Beziehungen zwischen den Zuständen der nun nicht mehr unabhängigen Teilchensysteme widerspiegeln.

Mathematisch heißt dies, dass im allgemeinen Fall der Gesamtzustand eine Überlagerung der einzelnen Zustände ist. Das ist ähnlich zur Überlagerung in der klassischen Wellenlehre, mit dem Unterschied, dass der durch eine Welle

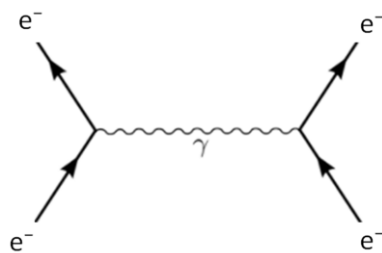


Abb. 4: Feynman Diagramm der Wechselwirkung zwischen zwei Elektronen e^- .

beschriebene Einzelzustand in der Quantenmechanik noch keine reale Bedeutung hat, sondern ihn erst durch eine auf diesen Zustand zugeschnittene Messung bekommt. Dadurch sind bestimmte andere Messungen nicht mehr möglich. Physikalisch drückt sich das in einem besonderen Phänomen in der Quantenmechanik aus, der sogenannten Verschränkung. Sie führt dazu, dass man verschränkten Teilchen keinen eigenen Zustand zuordnen kann, sondern nur dem ganzen System verschränkter Teilchen. Die Verschränkung wird erst

bei einer Messung aufgehoben und dabei offenbaren sich instantan, also unmittelbar über beliebige Entfernungen, Eigenschaften der anderen, damit verschränkten Teilchen. Wie weiter unten beschrieben werden wird, steht dies nicht im Gegensatz zur speziellen Relativitätstheorie und es können keine Informationen schneller als das Licht übermittelt werden. Allerdings ist dieser nichtlokale Aspekt der Quantenmechanik oder allgemeiner der Quantentheorie nach wie vor eine Zumutung für den sogenannten gesunden Menschenverstand.

Die Definition der Entropie S bleibt unabhängig von der klassischen oder der quantenmechanischen Sicht und ist in der Quantenmechanik ebenfalls eine Summe, die sich über die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Mikrozustände

Tensorprodukt der beiden Vektorräume. Es hat die Dimension $n \cdot m$ und wird von den Basisvektoren $\vec{e}_i \otimes \vec{h}_j$ aufgespannt. Die höhere Dimension und die Besonderheiten des nicht-kommutativen Tensorproduktes führen zu gravierenden Gegensätzen zur klassischen Physik. Ein allgemeiner Vektor $\vec{\psi} = \sum_{i,j} \alpha_{ij} \vec{e}_i \otimes \vec{h}_j$ eines Tensorproduktraumes lässt sich nicht als Produkt der Basisvektoren \vec{e}_i und \vec{h}_j , sondern nur als lineare Superposition schreiben.

²² Siehe dazu genauer: Max Born, Die Quantenmechanik und der 2. Hauptsatz, der Thermodynamik, Annalen der Physik, 438/1, 1948, S. 107-114. Dort findet sich auch ein Hinweis auf die offenbar erste Publikation zu diesem Thema von Wolfgang Pauli, Festschrift zum 60. Geburtstag von Arnold Sommerfeld, 1928, Hirzel-Verlag.

im Makrozustand errechnen lässt. Beim Begriff der „quantenmechanischen Zustände“ ist allerdings Vorsicht geboten. Sie sind Ausdruck unterschiedlicher Interpretationen der Quantenmechanik. So propagiert z.B. die „Kopenhagener Deutung“, die auf Niels Bohr und seine Schüler zurückgeht, ein neues physikalisches Weltbild ohne Determinismus und Kontinuität. Hinter unterschiedlichen Interpretationen der Quantenmechanik stecken tiefgreifende, erkenntnistheoretische Positionen über das, was „Realität“ bedeutet.

Die Entropie S kann man somit als ein Maß für die Information betrachten, die fehlt, in dem man zwar den überlagerten Zustand kennt, aber nicht die zugrunde liegenden Mikrozustände²³. Dieses Ergebnis führt zum nächsten Kapitel.

Entropie in der Informationstheorie

In einem System ist die Information H bzw. die Entropie S die minimale Menge an Information, um dessen Zustand vollständig charakterisieren zu können. Wird das System komplexer, erhöht sich der Informationsbedarf über das System und damit die Entropie. Information ist in der Informationstheorie eng verbunden mit Komplexität. Komplexität steht umgangssprachlich auch für Unübersichtlichkeit. Dies gilt auch in einer (zeitlichen) Entwicklung. Umso komplexer, umso weniger Information hat man nach einer gewissen Zeit über das System. Ein Teilbereich oder eine Komponente eines komplexen Systems ist nicht einem übergeordneten Regelwerk unterworfen, sondern folgt lokalen Regeln. Dies ist in der Thermodynamik auch der Fall. Selbst wenn der Ausgangszustand bekannt ist, so finden auf dieser lokalen Ebene ständig Vorgänge bzw. Übergänge statt. Diese folgen im Detail keiner Vorzugsrichtung, sind also symmetrisch. Aber nach einer großen Zahl an zufälligen Übergängen geht immer mehr Information über den Ausgangszustand verloren oder, umgekehrt formuliert, ist immer mehr Information erforderlich, um wieder die ursprüngliche Ordnung zu beschreiben. Man spricht vom „random walk“, wenn z.B. ein Teilchen einen stochastischen, scheinbar vom „Zufall“²⁴ bestimmten Weg aus verketteten Einzelabschnitten zurücklegt. Das abgeschlossene System insgesamt wird in seinem

²³ Vergleiche auch Begriffe wie Dichteoperator, von-Neumann-Entropie, etc. Die von Neumann Entropie (dimensionslos) wurde über quantenmechanische Überlegungen entwickelt und ist dann identisch mit der informations-theoretisch definierten Shannon-Entropie, wenn sie mit einer Konstante der Dimension $\frac{J}{K}$ (analog Boltzmann-Konstante k_B), multipliziert wird.

²⁴ Zur Abgrenzung von „Nicht-Vorhersagbarkeit“ und „Zufall“ siehe Kapitel „Deterministisches Chaos“.

Zustandsraum immer unbestimmter. Die Entropie nimmt mit großer Wahrscheinlichkeit zu²⁵.

Entropie in der Informationstheorie hat somit ebenfalls eine grundsätzliche Bedeutung. Information (in seiner gebräuchlichen Einheit Bit), Energie und Entropie können in einem engen Bezugsrahmen beschrieben werden (s.u.).

Es war Claude Elwood Shannon, der die Informationstheorie auf eine mathematische Grundlage gestellt hat. Er hat dazu in seinen Denkmodellen den Computer als Maschine vorweg genommen, die eine Information in endlich vielen Schritten darstellen kann.

Seine zentrale Definition ist das Bit als kleinste Informationseinheit – ein Begriff, der kaum in seiner Bedeutung unterschätzt werden kann. Auch die Entropie, die vor ihm bisher nur in der Physik betrachtet wurde, bezog Shannon in seine Überlegungen ein²⁶. Es gibt aber keine abstrakte Information, in dem Sinne, dass Information eine sozusagen geistige Substanz ist. Information benötigt einen Informationsträger und somit immer einen Bezug zur physikalischen Welt. In diesem Sinne wurden die grundlegenden Prinzipien der Informationstheorie von Claude E. Shannon erarbeitet und die Entropie aus der Thermodynamik quantitativ analog in die Informationstheorie übertragen. Shannon verstand dabei Entropie als Maß an Komprimierbarkeit für Informationen, insbesondere zum Zwecke der Datenübertragung. Die Einheit des Informationsgehaltes wurde Claude Shannon zu Ehren „Shannon“ genannt. Ebenso geht die Shannonsche Entropie nicht ins Detail zu kleinsten Informationsobjekten, die sich mit einem Bit codieren lassen. Nur der durchschnittliche Informationsgehalt ist maßgeblich. D.h. wenn es eine normierbare Wahrscheinlichkeitsverteilung $p(\underline{x})$ für einen Satz von Ordnungsparametern der Länge d gibt, so ist die Entropie H (H nicht S nach Shannon) sozusagen die Menge an „Zufall“ oder besser „Unbestimmtheit“ im System. Die Analogie zur Thermodynamik wird besonders im Fall diskreter

²⁵ Hinrichsen rechnet am Beispiel von einem Mol Helium in einem Behälter bekannter Größe über typische Impulse bei Raumtemperatur das Phasenraumvolumen aus. Daraus kann man die Information in Bit abschätzen, die nötig ist, um den Quantenzustand eines einzelnen Teilchens zu kennen. Sie muss wegen der Ununterscheidbarkeit durch die Anzahl der möglichen Permutationen der Avogadro-Konstante bereinigt werden und beträgt ca. 22 Bit. Das ganze Mol Helium von ca. 22,4 Liter hat einen Informationsgehalt von $1,3 \cdot 10^{25}$ Bit. Das ist ca. 5.000 mal mehr, als die Speicherkapazität aller bislang produzierten Speichermedien.

(https://www.physik.uni-wuerzburg.de/fileadmin/11030300/_imported/fileadmin/tp3/ThermoEDynamik/Entropie.pdf)

²⁶ Der Boltzmannsche Beweis umfasst 20 Druckseiten. Über die Informationstheorie lässt sich eine analoge Aussage, die dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik entspricht, wesentlich leichter beweisen.

Variablen deutlich. Nummeriert man sie mit $i=1, 2, \dots, s$ und ordnet ihnen Wahrscheinlichkeiten p_i zu, so ist die Shannon-Entropie definiert als

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

Ebeling et.al. fassen die Überlegungen wie folgt zusammen²⁷: *Die statistische Entropie des Makrozustandes entspricht der Information, die notwendig ist, um den Mikrozustand aufzuklären.*

Je mehr Information über ein System vorliegt, umso bestimmter ist sein Zustand.

Je größer die Unbestimmtheit, desto größer ist die Entropie. Sie ist ebenso wie in der Boltzmannschen Thermodynamik ein Ordnungsmaß, proportional zum Logarithmus der Zahl der möglichen Mikrozustände.

Da, wo die individuelle Komprimierbarkeit verlangt ist, ist dies unbefriedigend.

Diese Aufgabe löst die Kolmogorov-Komplexität. Sie wird oft algorithmische Komplexität oder, wegen des Bezugs zu Entropie, auch algorithmische Entropie genannt. Information lässt sich grundsätzlich binär codieren und im Prinzip auf eine binär codierte Zeichenkette reduzieren. Um diese darzustellen, ist ein Programm erforderlich, das die Position jedes Bits, also jeder 0 oder 1 in der Kette, im Detail berücksichtigt. Das kürzeste Programm definiert die Kolmogorov-Komplexität einer Information. Ist die (binäre) Zeichenkette vollkommen zufällig, lässt sich die Information nicht weiter komprimieren. Man kann es sich als geschickt gestellte Folge von Fragen vorstellen, die jeweils mit Ja oder Nein zu beantworten sind. Obwohl jede beliebige, endliche Zahlenfolge in den Nachkommastellen der Kreiszahl π gefunden werden kann²⁸ und somit scheinbar „zufällig“ verteilt ist, ist π jedoch durch ein einfaches Programm darstellbar²⁹.

Leonhard Suskind kommt über informationstheoretische Überlegungen zu einer adäquaten Definition der Entropie: *Die Entropie ist ein Maß der Zahl von Anordnungen, die einem bestimmten erkennbaren Kriterium entsprechen.* Lautet das Kriterium, dass es (z.B.) 65 Bits gibt, so ist die Zahl der Anordnungen 2^{65} , siehe³⁰.

²⁷ Ebeling, W. et.al., Komplexe Strukturen: Entropie und Information, B.G.Teubner, Stuttgart-Leipzig, 1998, S. 36f

²⁸ Man kann es z.B. mit dem Geburtsdatum ausprobieren: <http://www.angio.net/pi/> Mein 8-stelliges Geburtsdatum kommt als Zahlenstring in den ersten 200 Millionen Nachkommastellen von π dreimal vor.

²⁹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Dezimalsystem#Dezimalbruchentwicklung>

³⁰ Suskind, Leonhard, Der Krieg um das Schwarze Loch, Suhrkamp 2010, S. 154

Lee Smolin verbindet in seiner Definition der Entropie die Physik und Informationstheorie:

Zitat:

Entropie: Ein Maß für die Unordnung eines physikalischen Systems, das mit der Information verknüpft ist, die in den genauen Werten seiner mikroskopischen Freiheitsgrade steckt.

Der Zusammenhang von Information und Energie

Bedeutende Physiker glauben, dass Information nicht nur ein abstrakter Begriff ist, sondern als Grundbaustein unserer Welt betrachtet werden sollte³¹. Dazu gehört vor allem John A. Wheeler, akademischer Lehrer vieler Nobelpreisträger. Von ihm stammt die Phrase „it from bit“, die dies verdeutlichen soll³²; (mehr dazu im Abschnitt „Entropische Gravitation bzw. Holographisches Prinzip“). Allerdings gibt es Informationen, die keinen Sinn ergeben („statistische Information“) oder solche, die einen Sinn im Sinne einer mathematisch reduzierbaren Regelmäßigkeit ergeben. Ein plakatives Beispiel verwendet Sedlacek³³. Man betrachte zwei Zahlenfolgen F1 und F2

$F1 = \{01010101010101010101\}$

$F2 = \{10011010111101000100\}$

Man erkennt bei F1 sofort die Regelmäßigkeit. Ein Informatiker würde F1 als Bitfolge mit deutlich geringerem Aufwand darstellen – man braucht dazu nur 6 Bit.

Sie entsprechen 6 geschickt gestellten Ja/Nein-Fragen, ob nun eine Null oder eine Eins folgt, nämlich 2 Bit für 01 und 4 Bit für die 10-malige Wiederholung. F2 mit seinen ebenfalls 20 Zeichen

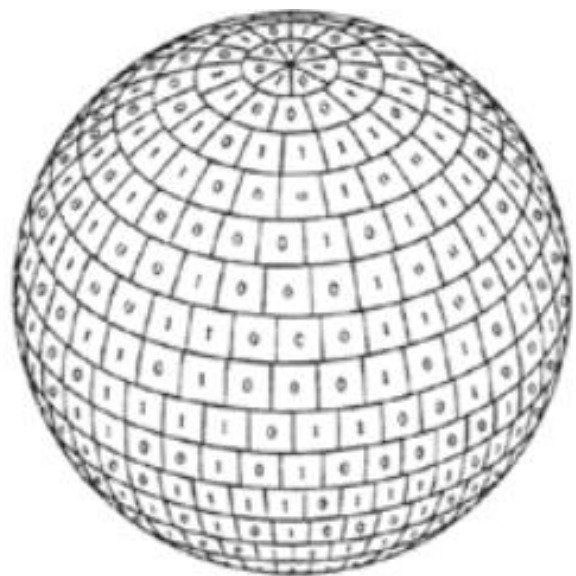


Abb. 5: Verdeutlichung von Wheelers „it from bit“. Entropie als Information proportional zur Oberfläche.

³¹ <https://www.heise.de/tp/features/Es-stellt-sich-letztlich-heraus-dass-Information-ein-wesentlicher-Grundbaustein-der-Welt-ist-3448658.html>

³² Quelle der Grafik: John A. Wheeler, The Search for Links, <https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf>, Figure 19.1, S. 312 reproduced from Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1989, pp.354-368

³³ Sedlacek, Klaus-Dieter, Äquivalenz von Information und Energie, Books on Demand (BoD) Norderstedt, 2017, S. 12.

dagegen lässt sich nicht weiter reduzieren. Hier benötigt man die vollen 20 Bit.

Der Logarithmus der Anzahl an Mikrozuständen multipliziert mit der Boltzmann-Konstante erweist sich als die thermodynamische Entropie. Diese Anzahl ist andererseits die unbekannte Entropie in Bit. Entropie ist hier definiert als Maß für den mittleren Informationsgehalt eines Zeichens. Beim Vergleich ist allerdings Vorsicht geboten. Boltzmann bezog sich auf Physik, Shannon machte dagegen zunächst rein mathematische Überlegungen. Doch die Anzahl der Mikrozustände, die Boltzmann mit großem Aufwand untersucht hat, erweist sich als die unbekannte Information in Bit³⁴. Da die thermodynamische Entropiedifferenz äquivalent zu einem Energiebetrag ist und die Information in Bit äquivalent zur Entropie, ist somit die Informationsdifferenz äquivalent zu einer Energiemenge. Bei der Entropie ist die Äquivalenz unmittelbar einsichtig, bei Information und Energie bedarf es jedoch einer genauen physikalisch begründeten Zuordnung zwischen beiden Begriffen.

Die Definitionen von Suskind oder Smolin verbinden somit Thermodynamik und Informationstheorie³⁵, beziehen sich jedoch nur auf die Entropie.

Erst in einem physikalischen Rahmen lassen sich Information, Entropie und bedingt auch Energie als Äquivalenzbeziehung charakterisieren.

Allerdings reicht dies noch nicht für eine Gleichsetzung aus. Diese geht erst nach Pagel³⁶ dann hervor, wenn Information als dynamische Größe Bit/s („Bit pro Sekunde“) definiert und physikalisch begründet, also objektiviert wird. Man kann es plakativ damit verdeutlichen, dass der Wert von Information auch davon abhängt, wie schnell sie zur Verfügung steht. Die Entropieänderung pro Zeiteinheit ist dann die Informationsmenge, die nötig ist, um in der getakteten Zeiteinheit ständig über den Zustand des Systems informiert zu sein. Dabei kann der Informationsfluss systemübergreifend stattfinden. Pagel leitet über die dynamische Definition der Information aus dem Energieerhaltungssatz einen Informationserhaltungssatz ab³⁷. Die Entropie einer Bitfolge, als Maß ihrer Unbestimmtheit, kann dann in Energie umgerechnet werden, die nötig ist, sie zu übertragen. Die Querbeziehung zur Energie wird also über den Transportaufwand von Information hergestellt.

³⁴ Sedlacek, S. 19

³⁵ Seine Erkenntnisse gehen auf einen freundschaftlichen Wettstreit zwischen ihm und Gerard 't Hooft einerseits und Stephen Hawking andererseits um die Existenz und Natur von Schwarzen Löchern zurück (siehe nächster Abschnitt). Ausgerechnet die Beschäftigung mit den wohl seltsamsten astronomischen Objekten ebnete den Weg, um immer mehr Querbeziehungen zur Informationstheorie zu entdecken.

³⁶ Pagel, Lienhard; Information ist Energie, Springer, Wiesbaden 2013

³⁷ ebenda, S. 56f.

Dies ist eine sehr weitgehende Argumentation, sogar mit erheblichen erkenntnistheoretischen Konsequenzen. Allerdings wird vor allem die aktuelle Forschung in der Kosmologie von solchen Überlegungen inspiriert.

Auf jeden Fall bleibt die unzweifelhafte Äquivalenzbeziehung zwischen den drei extensiven Größen Information, Entropie und Energie erhalten.

Entropie und Schwarze Löcher

Schwarze Löcher gehören zu den rätselhaftesten Objekten im Kosmos. In letzter Zeit gibt es viele Erkenntnisse durch astronomische Beobachtungen und theoretische Forschungen³⁸. In einem spektakulären, aufwendigen Projekt wurde ein Schwarzes Loch sogar indirekt beobachtbar – es konnte ein Bild erstellt werden. Trotz aller theoretischen und astronomischen Ergebnisse ist die genaue Physik der Schwarzen Löcher noch nicht vollständig aufgeklärt. Nachdem Einstein 1915 seine Feldgleichungen zur allgemeinen Relativitätstheorie veröffentlicht hatte, entwickelte bereits ein Jahr später Karl Schwarzschild daraus eine Lösung für eine punktförmige, nicht-rotierende und nicht-geladene Masse, in der eine Singularität auftritt, also die physikalischen Gesetze an diesem Punkt eine mathematische Unendlichkeit zeigen. Der Radius um ein solches Objekt, in dem noch nicht einmal elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit entweichen können, ist nach ihm benannt worden bzw. wird Ereignishorizont genannt. Von innerhalb des Schwarzschild-Radius oder des Horizontes kann weder Materie noch Strahlung entkommen. Damit sind nach klassischer Auffassung Materie und Energie und alle Informationen, die damit transportiert werden, unwiederbringlich verloren. Es stellt sich die fundamentale Frage, ob dort der 2. Hauptsatz der Thermodynamik nicht mehr gilt. Ist ein Schwarzes Loch nur durch seine Masse und seinen Drehimpuls charakterisiert? Nimmt dort die Entropie eines geschlossenen Systems ab? Stephen Hawking war zunächst dieser Ansicht. Jacob Bekenstein und insbesondere Gerard 't Hooft und Leonhard Susskind stemmten sich gegen diese Auffassung. Der freundschaftliche Wettstreit wurde später von Susskind in einem Buch dokumentiert³⁹. Hawking selbst legte den Grundstein zur Beantwortung der Frage, indem er durch quantenmechanische und relativistische Überlegungen nachwies, dass Schwarze Löcher Strahlung abgeben müssen. Es war der erste Spezialfall, bei dem die Verbindung von Quantentheorie und allgemeiner Relativitätstheorie

³⁸ <https://www.weltderphysik.de/thema/nobelpreis/nobelpreis-fuer-physik-2020/>

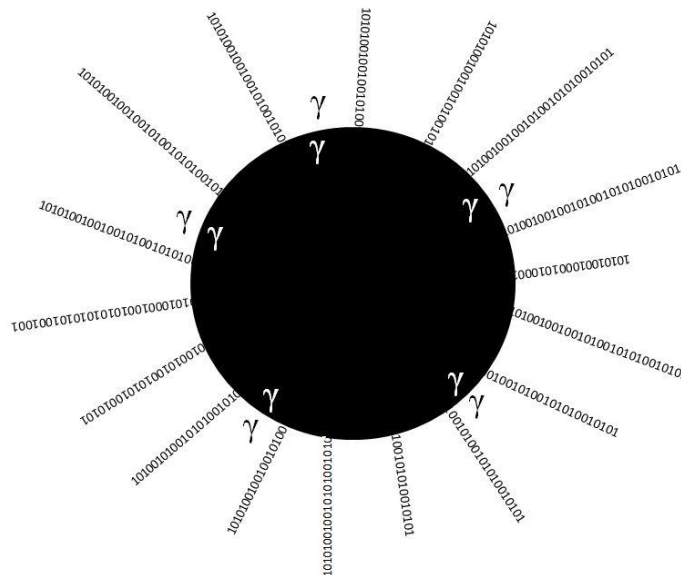
³⁹ Susskind, Leonhard; Der Krieg um das Schwarze Loch, Suhrkamp, Berlin 2010.

gelang. Allgemein ist diese Verbindung immer noch eines der größten ungelösten Probleme der modernen Physik.

Grundlage war allerdings ein Erkenntnis von Bekenstein, die heute nach beiden Forschern benannt ist. Die Bekenstein-Hawking-Entropie ordnet einem Schwarzen Loch einen formalen Entropiewert zu, der nur vom Oberflächeninhalt des Ereignishorizonts und von fundamentalen Naturkonstanten abhängt⁴⁰. Direkt am Schwarzschildradius entstehen gemäß der Quantentheorie (wie überall) virtuelle Teilchen/Antiteilchen-Paare, von denen eines in das Schwarze Loch fallen kann, während das andere entweicht. Dies kann man mit zwei Modellen interpretieren:

- 1) Das in das Schwarze Loch fallende Teilchen oder Antiteilchen hat negative Energie, die nach $E=mc^2$ auch einer negativen Masse entspricht, die die Masse des Schwarzen Lochs verringert.
- 2) Ein Teilchen negativer Energie kann man auch als Teilchen positiver Energie interpretieren, bei dem die Zeitrichtung umgekehrt wird, die Zeit also „rückwärts“ läuft und damit das Teilchen als abgegebene Strahlung gedeutet werden kann.

Somit kann man über diese sogenannte Hawking-Strahlung dem Schwarzen Loch eine Entropie und damit eine Temperatur zuordnen. Da die Strahlung von der Oberfläche abhängt, ist sie zu dieser proportional. Dies ist bemerkenswert.



*Abb. 6: Verschwindet alles im Schwarzen Loch; damit auf immer auch Information? Gilt dort nicht mehr der 2. Hauptsatz⁴¹?
Hawking-Strahlung γ - γ würde das Dilemma beseitigen.*

⁴⁰ Siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Bekenstein-Hawking-Entropie>

⁴¹ Der Zusatz „der Thermodynamik“ wurde bewusst weggelassen.

Damit ist die Entropie nicht vom Volumen, also einem Raum, abhängig, sondern von der Oberfläche. Die Information steckt in einer Fläche, ähnlich wie in einem Hologramm⁴². Die Temperatur ist umgekehrt proportional zur Masse, d.h. ein Schwarzes Loch ist umso kälter, je größer es ist. Es wird zwar irgendwann verdampft sein, aber die Lebensdauer eines „normalen“, über eine Supernova entstandenen Schwarzen Lochs übersteigt das Alter des Universums um viele Größenordnungen⁴³. Bei diesen Forschungen stellt sich die Frage, ob der Begriff Entropie ausschließlich in der Thermodynamik verortet werden soll und er in der Informationstheorie lediglich adaptiert wurde. Ist im Fall der Hawking-Strahlung ein virtuelles Teilchen ein Mikrozustand, der in zwei Komponenten zerfällt, die dann im wahrsten Sinne des Wortes unterschiedliche Wege gehen? Zumindest entsteht in diesen Fragestellungen erhöhter Interpretationsbedarf zum Entropiebegriff.

Es gibt Theoretiker, die diese holographische Sichtweise auf das ganze Universum übertragen, also vermuten, dass die vollständige Information in einem Raumbereich durch seine Oberfläche gegeben ist, ähnlich dem Flächengesetz der Entropie bei Schwarzen Löchern⁴⁴. Dies sind heute noch nicht bewiesene Spekulationen, aber sie gelten als aussichtsreiche Kandidaten, um Gravitation und Quantentheorie zu einer Theorie der Quantengravitation zu vereinigen⁴⁵ (siehe dazu nächsten Abschnitt.). Theoretisch bewiesen ist die Äquivalenz/Isomorphie zwischen einer speziellen 5-dimensionalen Raumzeit („Anti-de-Sitter-Raum“) und der 4-dimensionalen Raumzeit. Ein solcher Isomorphismus verlangt ein gewisses Maß an Redundanzen beim höherdimensionalen Raum (sonst ist es nur bestenfalls ein Homomorphismus, ähnlich einer Projektion). Der 4-dimensionale Raum ist dann als Hologramm des höher dimensionalen Raums zu verstehen⁴⁶. Diese

⁴² Nicht zu verwechseln mit einer Projektion

⁴³ Anders sieht es bei kleinen Schwarzen Löchern im Bereich 10^{12} kg aus (so es sie gibt). Hier liegt die Temperatur bei 10^{11} K, bei der massebehaftete Teilchen emittiert werden. Die Hawking-Temperatur T_H eines Schwarzen Lochs der Masse M ist $T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}$ mit c Lichtgeschwindigkeit, G Gravitationskonstante, h Plancksche Konstante und $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ und k_B Boltzmann Konstante.

⁴⁴ Zum Holographischen Prinzip siehe einen bemerkenswerten Beitrag von John Archibald Wheeler, posthum neu veröffentlicht in <https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf>, reproduced from Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics, Tokyo, 1989, pp.354-368. Daraus stammt die berühmte Phrase „It from Bit“.

⁴⁵ Siehe dazu einen Artikel von Bekenstein selbst:

<https://www.spektrum.de/magazin/das-holografische-universum/830304>

⁴⁶ S. z.B. <https://www.astronews.com/news/artikel/2015/04/1504-031.shtml> oder <https://www.cam.ac.uk/research/news/taming-the-multiverse-stephen-hawkings-final-theory-about-the-big-bang>

Überlegungen haben eine Fülle von Forschungsaktivitäten ausgelöst⁴⁷. Konkret zeigt sich jedoch dieses Flächengesetz bei supraflüssigem Helium (^4He). Dabei entsteht für alle Heliumatome ein gemeinsamer Quantenzustand („Bose-Einstein-Kondensat“). Die Atome verschränken sich, Reibung verschwindet und Helium wird supraleitend. Eine kanadische Arbeitsgruppe⁴⁸ hat nun in realistischen Computermodellen nachgewiesen, dass die Entropie als Folge der Verschränkung in diesem supraflüssigem Helium-4 nicht mit dem Volumen, sondern deutlich langsamer, nämlich proportional zur Oberfläche steigt. Dabei wurde eine Reihe von Kugelschalen simuliert und die Maß an verschränkten Helium-Atomen in dieser virtuellen Kugel zu einem Quantenzustand ermittelt.

Entropische Gravitation

Im allgemeinen Verständnis der meisten Physiker ist die Gravitation eine der vier Grundkräfte, die, wie Starke Kernkraft, Schwache Kernkraft, Elektromagnetische Kraft, über ein anderes Austauscheteilchen, das hypothetische Graviton, wirkt. Im Gegensatz zu den beiden ersten Kräften mit kurzer Reichweite, müsste das Graviton, wie das Photon als Austauscheteilchen im Elektromagnetismus, masselos sein. Die Theorie der „Entropischen Gravitation“ vermeidet diese Erklärung. Danach soll ein Raumbereich, der gravitativ wirkende Masse oder Strahlung enthält, nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik einen Zustand höherer Entropie anstreben. Daraus resultiert eine Kraft, die sich als Gravitationseffekt, also anziehende Kraft zwischen Massen und/oder Energie, manifestiert. Die Theorie der „Entropischen Gravitation“ macht in weiten Teilen der makroskopischen Welt vollkommen deckungsgleiche Vorhersagen wie die Gravitationstheorien von Newton und die Allgemeine Relativitätstheorie von Einstein. Aber auf Längenskalen, die besonders dem Wirkungsbereich der Quantentheorie entsprechen, berücksichtigt sie Quantenfluktuationen⁴⁹. Das führt dazu, dass dort die Gravitationsbeschleunigung nicht mit $1/r^2$, sondern nur mit $1/r$ abnimmt. Mittlerweile ist es gesichert, dass die Rotation von Galaxien nicht mehr nur als vom Einfluss sichtbarer Materie verursacht,

⁴⁷ <https://www.spektrum.de/news/die-struktur-von-raum-und-zeit-wird-von-astrophysikern-und-quantenforschern-untersucht/1435484>

⁴⁸ Entanglement area law in superfluid ^4He , C. M. Herdman, P.-N. Roy, R. G. Melko, A. Del Maestro

<https://arxiv.org/abs/1610.08518> (Submitted on 26 Oct 2016)

⁴⁹ Also eine kurzfristige spontane Entstehung eines Teilchen/Antiteilchen-Paares im Vakuum, oft erklärt über die Heisenbergsche Unschärferelation bzgl. Energie und Zeit.

erklärt werden kann, die sich nach den Gesetzen der klassischen Gravitationstheorien bewegt. Es wurde deshalb die Existenz Dunkler Materie postuliert. Über die Entropische Gravitation wurde dagegen das Gravitationsgesetz modifiziert.

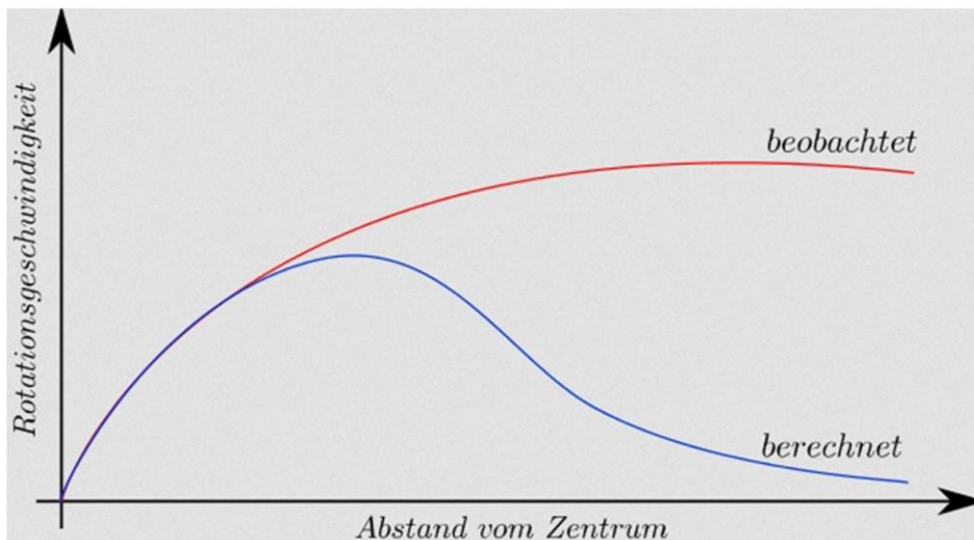


Abb. 7: Die Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien lässt sich nicht von klassischen Gravitationsgesetzen auf Basis der sichtbaren Materie erklären⁵⁰.

Die „Entropische Gravitation“ ist somit ein Erklärungsaspekt der MOND-Theorie („Modifizierte Newtonsche Dynamik“) und kommt ohne Dunkle Materie aus. Bei MOND ohne Berücksichtigung der „Entropischen Gravitation“ ist die Mathematik zwar erstaunlich einfach, aber impliziert, dass die Masse des Gravitons ungleich Null ist⁵¹. Dies ist schwer mit einer unendlichen Reichweite der Gravitation zu vereinbaren. Dagegen helfen Entropie-Überlegungen, so dass danach eine Form von positiv wirkender Energie wirkt, die sozusagen die Nullpunktsenergie der Raumzeit verschiebt⁵².

⁵⁰ Quelle: Wikipedia, Bild: Johannes Schneider, Lizenz: CC BY-SA 4.0, aus http://www.andromedagalaxie.de/html/galaxien_dunkle_materie.htm

⁵¹ Siehe dazu auch Kafitz, Symmetrie, Oberhessische naturwissenschaftliche Zeitschrift, Band 67, S. 84 und Anm. 125

⁵² Quantitative Überlegungen finden sich bei Wikipedia,

https://de.wikipedia.org/wiki/Entropische_Gravitation

Hier sind auch weitere interessante Hinweise auf Forschungsarbeiten von u.a. Bekenstein, Hawking, Susskind, 't Hooft, Verlinde u.a.

Zeitverläufe

In den meisten Naturgesetzen und von den Begründern der Dynamik, also von Galilei, Newton oder anderen wird von einer symmetrischen Zeit ausgegangen. Das sollte heißen, dass im Prinzip alle Vorgänge reversibel ablaufen können. Fast alle elementaren physikalischen Gesetze sind invariant gegenüber Zeitumkehr („T-Symmetrie“). Sie ist eine der drei wichtigen Symmetrien⁵³ im Rahmen der Quantentheorie: Invarianz gegenüber Ladungsumkehr (C), gegenüber Parität, also links/rechts-Händigkeit (P) und gegenüber Zeitumkehr (T)⁵⁴. Es sind allerdings subtile Verletzungen, sogenannte Symmetriebrüche, bei allen Symmetrien und Kombinationen der Natur bekannt. Sie werden gedeutet, dass damit das Übergewicht von Materie gegenüber Antimaterie im Universum zusammenhängt. Es sind also fundamentale Fragestellungen auch bei der T-Symmetrie damit verbunden. Das Vorzeichen der Zeit spielt in den grundlegenden Formeln insofern keine Rolle, als mathematisch plausible Lösungen für diesen Fall existieren. Selbst in der Quantentheorie sind manche Vorgänge dadurch erklärbar, dass man annimmt, dass die Zeit „rückwärts“ abläuft. Dirac z.B. nahm die „2. Lösung“ seiner Gleichungen ernst. Sie musste eine physikalische Bedeutung haben. Später wurde das Antiteilchen des Elektrons, das Positron, durch Carl David Anderson gefunden⁵⁵.

Anders ist die Situation, wenn die Entropie ins Spiel kommt. Die beiden grundlegenden Sätze der Thermodynamik beschreiben also Energieerhaltung und Entropiezunahme als Naturgesetze in geschlossenen Systemen⁵⁶. Doch im Gegensatz zur Energie hat die Entropie etwas mit Wahrscheinlichkeit zu tun. Betrachtet man den zeitlichen Ablauf ohne Kompensation durch Energiezufuhr, so liegt die geringere Entropie oder höhere Ordnung praktisch immer in der Vergangenheit; die höhere Entropie oder Unordnung praktisch immer in der Zukunft. Entropie definiert somit die Richtung des Zeitpfeils; sie ist schlechthin die Ursache für das, was wir als „Zeit“ bezeichnen. Dabei läuft die Zeit immer weiter.

⁵³ Es ist eine plausible Annahme in der klassischen Physik, dass die fundamentalen Naturgesetze zu jeder Zeit, an jedem Ort und in jeder Richtung überall gleich sind. Daraus leitete Emmy Noether Energieerhaltung (symmetrisch bei Verschiebungen in der Zeit), Impulserhaltung (symmetrisch bei Verschiebungen im Raum) und Drehimpulserhaltung (symmetrisch bei Drehungen im Raum) ab.

⁵⁴ <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/news/2012/verletzung-der-zeitsymmetrie-beobachtet/>

⁵⁵ Für die Energie $E = \pm \sqrt{c^2(\hbar^2 \vec{k}^2)^2 + m^2 c^4}$ existiert eine positive und negative Lösung.

⁵⁶ Streng genommen sind beide Hauptsätze empirische Tatsachen. Der 1. Hauptsatz besagt, dass Energien ineinander umgewandelt werden können, der 2. Hauptsatz lässt auch eine gleichbleibende Entropie zu.

Man muss sich fragen, wieso überhaupt komplexe Lebensformen auf der Erde entstanden sind. Der Lebensraum Erde mit seiner Selbstorganisation, die nach und nach zur heutigen Biodiversität geführt hat, ist nur durch Energiezufuhr, insbesondere durch Sonnenlicht, Sonnenwärme sowie durch tektonische, gravitativ erzeugte Reibung (von außen) bzw. in geringerem Maße auch durch Zerfall radioaktiver Elemente (von innen) denkbar. Die Entropiebilanz wird insbesondere von der Sonne maßgeblich beeinflusst und hat dort, wo sich Selbstorganisation entwickelt hat, zu Entropieabnahme geführt. Betrachtet man nur erdgeschichtlich kurze Zeiträume, so ist keine Erwärmung oder Abkühlung der Erde feststellbar. Es wäre vermessen zu sagen, dass die Sonnenenergie vollständig zur Entropieabnahme bei der Selbstorganisation verwendet wird. Ein Gutteil der Energie wird in das Weltall abgestrahlt. Jedenfalls ist die Energiebilanz ausgeglichen; es herrscht ein Fließgleichgewicht. Aber: Der Zeitpfeil ist trotz der energetischen Kompensation insbesondere durch die Sonne in vielen Vorkommnissen des Alltags erkennbar.

Es gibt zumindest auf der makroskopischen Ebene keinen Prozess, der vollständig reversibel ist⁵⁷. Immer entstehen nicht nutzbare Wärme oder sonstige Energieformen, die die Entropie erhöhen. Oder aber ein vollständig reversibler Vorgang ist deutlich unwahrscheinlicher, d.h. schon allein durch statistische Überlegungen kommt man zum Schluss, dass sich die Entropie eines geschlossenen Systems niemals erniedrigt. Wenn ein Ei vom Küchentisch rollt und zerbricht, dann ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Missgeschick sich spontan rückgängig macht, zwar nicht exakt Null. Aber die Reversibilität dieses Vorgangs ist so unwahrscheinlich, dass das Vielfache Alter des Universums nicht ausreichen würde, dass dieser Vorgang auftreten und damit zu beobachten wäre. Ein entsprechender Film, der rückwärts läuft, wird sofort als „unmöglichen“ Vorgang erkannt, wenn sich z.B. Personen darin bewegen. Das zerbrochene Ei kann man sozusagen als „kosmologisches Experiment“ verstehen, mit dem Vergangenheit und Zukunft definiert werden

⁵⁷ Christian Blöss schlägt vor, Entropie über einen quantenmechanischen Ansatz als unabhängige Basisgröße zu bestimmen, nämlich mit dem planckschen Konzept der quantisierten Lichtmenge. Es bietet sich dabei an, die thermische Zustandfunktion des Lichtgases aus Ausgangspunkt zu verwenden und aus Strahlungsdruck, Hohlraumvolumen und Photonenzahl der Hohlraumstrahlung diese zu konstruieren. Die Boltzmann Konstante geht dann nicht stoffbezogen, sondern photonenzahlenbezogen hervor. Somit sind Photonen als Austauschbosonen des elektromagnetischen Feldes die Quanten der Entropie. Entropie als Ursache für den Zeitpfeil und darüber hinaus als zentraler Antrieb von vielen Prozessen in der Physik wäre also auch darin begründet, dass Photonen geradezu allgegenwärtig sind (https://entropieeinheit.cbloess.de/index.html?extgroe_lichtm_lichtgas_entropiedichte.htm.)

können. Sie werden durch einen kurzen, physikalisch, philosophisch und religiös schwer fassbaren Moment getrennt, den man Gegenwart nennt⁵⁸. Die Zunahme der Entropie definiert nach einer These von Arthur Eddington die Richtung des Zeitpfeils, von der Vergangenheit zur Zukunft. Die Tatsache, dass sich die Vergangenheit jeglicher kausaler Manipulation entzieht, macht die physikalische Zeit (im Gegensatz zur erlebten Zeit) an sich aus⁵⁹. Allerdings hat die Relativitätstheorie deutlich gemacht, dass es keine absolute Zeit gibt, dass Gleichzeitigkeit eine Illusion ist, dass Raum nur in Verbindung mit Zeit plausibel beschrieben werden kann und umgekehrt.



Der Zeitpfeil trennt Vergangenheit und Zukunft klar.

Die Relativitätstheorie hat jedem Beobachter seine eigene Gegenwart zugeordnet.

Abb. 8: Gemäß der Relativitätstheorie gibt es keine Gleichzeitigkeit. Die Entropie definiert trotzdem einen Zeitpfeil von Vergangenheit zu Zukunft.

Dies ist keine philosophische Haarspalterei. Wir nutzen bereits technologisch die Relativitätstheorie mit den Implikationen auf die Zeit. Ein Beispiel ist die Standortbestimmung über GPS. Auch Zeitdilatation⁶⁰ ist unzweifelhaft

⁵⁸ Siehe Muller, Richard A., Jetzt – Die Physik der Zeit, S. Fischer, Frankfurt a. Main, 2018, S. 131.

⁵⁹ „Zeit ist, was verhindert, dass alles auf einmal passiert.“ (John A. Wheeler)

⁶⁰ Die Zeitdilatation bewegter Teilchen kann durch Lebensdauer- bzw. Zerfallszeitmessungen von Teilchen bestimmt werden. Die Zeitdilatation gemäß der speziellen Relativitätstheorie besagt, dass wenn eine Uhr C zwischen zwei synchronisierten, in einem Labor ruhenden Uhren A und B bewegt wird, sie gegenüber den beiden Uhren zeitlich nachgeht. Da prinzipiell jeder periodische Vorgang als Uhr bezeichnet werden kann, gilt dies z. B. auch für die Lebensdauern bzw. Zerfallszeiten von instabilen Teilchen wie beispielsweise Myonen. Das heißt, bewegte Myonen müssten eine längere Lebensdauer haben als ruhende. Zum Nachweis dieses Effekts werden Messungen in der Atmosphäre als auch in Teilchenbeschleunigern mit verschiedenen Teilchenarten durchgeführt, wobei alle Resultate die Zeitdilatation bestätigen.

(Zitat: https://de.wikipedia.org/wiki/Zeitdilatation_bewegter_Teilchen)

experimentell messbar. Vergangenheit und Zukunft, aber vor allem die Gegenwart, das „Jetzt“, sind also deutlich differenzierter zu sehen.

Trotzdem haben diese Begriffe auch in der modernen physikalischen Welt ihre Existenzberechtigung. Spätestens sobald makroskopische Prozesse betrachtet werden können, gilt das Kausalitätsprinzip: Die Vergangenheit kann die Zukunft beeinflussen, aber nicht umgekehrt. Das Kantsche und Newtonsche Verständnis einer kontinuierlich fließenden Zeit wurde durch die moderne Physik empfindlich erschüttert. Einzig die Informationsübermittlung genügt dem Kausalitätsprinzip und die Lichtgeschwindigkeit ist der begrenzende Faktor, Ansonsten ist Nicht-Lokalität und Verletzung der Kausalität durch den Zufall noch immer eine große Herausforderung für den sogenannten gesunden Menschenverstand.

Es bleibt aber dabei, dass dann, wenn eine Information den kausalen Anstoß für einen Folgevorgang liefern soll, der Zeitpfeil seine Gültigkeit besitzt. Quantentheoretisch verschränkte Teilchen können instantan, also ohne Rücksicht auf die Lichtgeschwindigkeit, in beliebiger Entfernung eine Quanteneigenschaft des verschränkten Teilchens offenbaren. Damit ist jedoch keine Informationsübermittlung, die schneller als das Licht funktioniert, realisierbar. Für diese gilt der durch Entropie definierte Zeitpfeil, wie ihn Eddington postuliert hat^{61,62}.

Deterministisches Chaos

In der Praxis ist bei vielen Systemen der nach einer gewissen Zeit resultierende Zustand nicht mehr vorhersagbar. Dabei heißt das nicht, dass der Zufall regiert. Ob ein radioaktives Teilchen im nächsten Moment zerfällt oder nicht ist tatsächlich zufällig. Hier ist die Natur nicht deterministisch⁶³. Doch in der makroskopischen Welt gelten physikalische Gesetze, die nicht dem Zufall unterworfen sind. Trotzdem kann die zeitliche Entwicklung zu unvorhersagbaren Ergebnissen führen. Das hat aber mit Zufall nichts zu tun.

⁶¹ Originalliteratur: Eddington, Arthur Stanley, Das Weltbild der Physik und ein Versuch einer philosophischen Bedeutung, 1928, in Deutsch 1931 bei Springer, S. 42ff

⁶² Steven Hawking wollte im Jahr 2009 mit einem ungewöhnlichen Experiment beweisen, dass Zeitreisen tatsächlich nicht möglich sind. Er veranstaltete eine große Party, zu der er ausschließlich Zeitreisende aus der Zukunft einlud. Das Besondere: Er veröffentlichte die Einladungen erst nach der Feier, in der Hoffnung, dass Menschen in mehreren tausend Jahren darauf aufmerksam werden könnten. Leider kam niemand. (<https://www.mdr.de/wissen/zeit-fakten100.html>)

⁶³ Einstein konnte dies nicht akzeptieren (Gott würfeln nicht).

Es sollte also nicht der Eindruck entstehen, dass das makroskopische Naturgeschehen oder die Mathematik bei Verwendung des Begriffs „Chaos“ dem Zufall unterworfen ist. Ein geworfener Ball landet selten an haargenau derselben Stelle, eine geworfene Münze zeigt bei vielen Würfeln selten die gleiche Folge von Zahl oder Wappen. Die Naturgesetze bleiben immer gleich, aber die Stärke und Richtung der Würfe sind minimal verschieden. Exakt formuliert, die Ausgangsbedingungen variieren leicht und führen zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen. Erst die Iteration oder ein vergleichbarer Prozess in der physikalischen Natur, also die Tatsache, dass das Ergebnis wieder als neuer Ausgangswert unter den gleichen Naturgesetzen oder den gleichen Rechenregeln genommen wird, führt bei vielen Iterationen bzw. in einer mehr oder weniger langen zeitlichen Entwicklung ggfs. zu vollkommen unterschiedlichen Ergebnissen.

Ein klassisches Beispiel ist das Wetter. Der Anfangszustand ist trotz immer besser werdenden Messdaten zu unbestimmt, dass er keine Aussagen zulässt, wie der Endzustand nach vielen Tagen aussieht⁶⁴.

Selbst Einsetzen zweier beliebig naher Werte in nicht-lineare Funktionen und iterieren, indem der jeweils gefundene Funktionswert wieder neuer Ausgangswert wird, können nach endlich vielen Iterationen, beliebig weit voneinander entfernt liegen.

Dieses Rückkopplungsprinzip findet in vielen Lebensbereichen statt. Auch in der Mathematik sind solche Systeme bekannt und haben dazu beigetragen, die Chaos-Theorie zu begründen⁶⁵. Die Chaostheorie ist bereits 1977 von Siegfried Großmann und Stefan Thomae⁶⁶, sowie von Mitchell J.

⁶⁴ Der amerikanische Meteorologe Edward N. Lorenz stieß zum ersten Mal bei Wettervorhersagemodellen auf einen Effekt, dass minimale Änderungen der Ausgangsbedingungen zu vollkommen anderen Resultaten führen können. Dies ist unter dem Begriff „Schmetterlingseffekt“ bekannt. Lorenz hielt 1972 vor der American Association for the Advancement of Science einen Vortrag mit dem Titel: Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil set off a Tornado in Texas? Diese Ereignisse gelten als Beginn der Chaosforschung. Die 2. Bedeutung resultiert aus der Visualisierung des Effekts. Lorenz fand eine Werteverteilung, die einem Schmetterling ähnelt („seltsamer Attraktor“). Originalliteratur: Edward N. Lorenz: The Essence of Chaos. University of Washington Press, Seattle WA 1993,

⁶⁵ Siehe dazu z.B. Literaturverzeichnis die Bücher von Mandelbrot, Benoit B., Die fraktale Geometrie der Natur, Basel, Boston, Birkhäuser 1987, Peitgen, Heinz-Otto; Jürgens, Hartmut; Saupe, Dietmar; Bausteine der Ordnung Fraktale, Springer Verlag / Klett Cotta, 1992 bzw. Peitgen, Heinz-Otto; Jürgens, Hartmut; Saupe, Dietmar; Chaos Bausteine der Ordnung, Springer Verlag / Klett Cotta, 1994

⁶⁶ Siegfried Großmann, Stefan Thomae: Invariant distributions and stationary correlation functions of one-dimensional discrete processes. In: Zeitschrift für Naturforschung A. 32, 1977, S. 1353–1363

Feigenbaum⁶⁷ begründet worden. Fraktale sind eng mit dem Namen Benoît Mandelbrot verbunden (siehe S. 57).

Ein guter mathematischer Untersuchungsgegenstand ist die logistische Gleichung $f^{n+1}(x) = k x_n (1-x_n)$ oder anders geschrieben $x_{n+1} \rightarrow k x_n (1-x_n)$. Peitgen et.al.⁶⁸ betrachten für $x_{n+1} \rightarrow 4x_n(1-x_n)$ die Entwicklung über 80 Iterationen bei den Anfangswerten $x_{1a}=0,202$ und $x_{1b}=0,202001$. Der 2. Wert x_{1b} unterscheidet sich also vom 1. Wert x_{1a} nur um ein Millionstel. Das zweite Wertepaar nach einmaliger Iteration x_{2a} und x_{2b} unterscheiden sich erst in der 6. Stelle nach dem Komma, das dritte Wertepaar in der 5. Stelle. Bei den ersten ca. 15 Iterationen sind die Werte noch nahe beieinander. Dann unterscheidet sich die Werteentwicklung der beiden Anfangswerte schon bald auf drastische Weise.

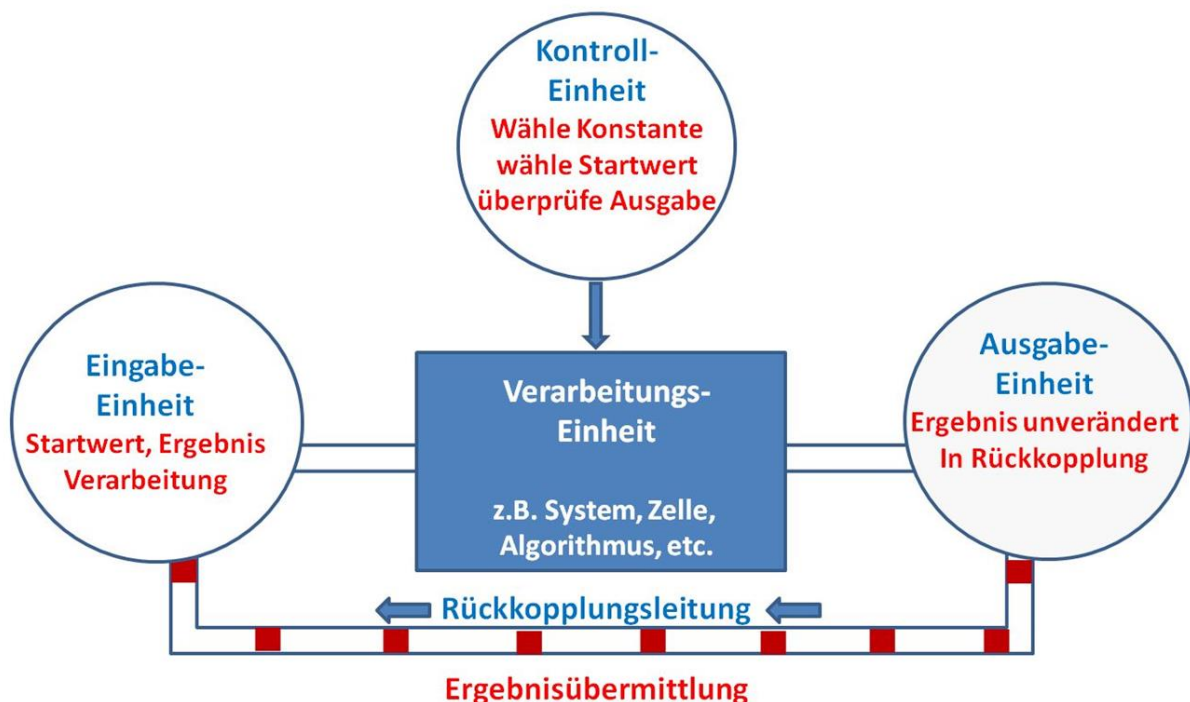


Abb. 9: In vielen Lebensbereichen findet eine ständige Rückkopplung statt, die man plakativ als „Rückkopplungsmaschine“ verdeutlichen kann.

Natürlich liegt es an der Konstruktion dieser quadratischen Gleichung, deren Wertebereich und Zielbereich immer zwischen 0 und 1 liegt. Dazu kommen oft

⁶⁷ Mitchell J. Feigenbaum: The universal metric properties of nonlinear transformations. 29. Mai 1979. In: Journal of Statistical Physics, 21, Dezember 1979, S. 669–706 (englisch; „ $\alpha = 2.502907876$ “ auf S. 703, „ $\delta = 4.6692$ “ auf S. 704)

⁶⁸ Peitgen, Jürgens, Saupe, CHAOS-Bausteine der Ordnung, Springer Verlag, S.43

in der Praxis unvermeidliche Rundungen beim Rechnen⁶⁹. Es entsteht damit zunehmend chaotisches Verhalten in dem Sinne, dass ähnliche Ursachen (im Beispiel verdeutlicht, dass die Differenz der Ausgangswerte nur ein Millionstel beträgt) nach mehr oder weniger langer Zeit unvorhersehbare Wirkung haben können (hier im Verlauf von 80 Iterationen).

Es ist solch eine „ähnliche Ursache“ im Sinne von Abbildung 10. Sie hat nichts mit Zufall zu tun und ist nicht unerklärlich. Die Phänomene entstehen durch Unübersichtlichkeit, Komplexität und damit Unvorhersagbarkeit.

Die logistische Gleichung ist keine reine mathematische Spielerei. Schon 1840 wurde von Pierre-François Verhulst⁷⁰ erkannt, dass sich Jäger/Beute-Tierpopulationen so modellieren lassen. k ist dabei der Vermehrungsfaktor, $(1-x_n)$ der Begrenzungsfaktor. Das Herz als Organ erzeugt einen laminaren Blutfluss. Bei einem k -Wert von ca. $3,57 < k \leq 4$ kann Turbulenz entstehen und damit tödliches Herzflimmern^{71,72}.

Es entsteht nicht immer chaotisches Verhalten. Bei den einfachen mathematischen Beispielen kann man schnell drei Möglichkeiten bei wachsenden Iterationen $f^n(x)$ identifizieren:

- 1) Die Funktionswerte $f^n(x)$ bewegen sich nach einigen Iterationen chaotisch.
- 2) Die Funktionswerte $f^n(x)$ bewegen sich auf einen Fixpunkt hin.
- 3) Die Funktionswerte $f^n(x)$ bewegen sich periodisch.

Chaos heißt nicht, dass jegliche Ordnung verloren geht bzw. dass keine Gesetzmäßigkeiten zu erkennen sind. Variiert man den k -Wert zwischen 2,4 und 4 so zeigt das Diagramm bei wachsendem k Verzweigungen, sogenannte Bifurkationen. Die erste Bifurkation entsteht bei $k=3,0$, die zweite bei $k=1+\sqrt{6} \approx 3,4494\dots$ Es zeigt sich, dass das Verhältnis der Abstände/Längen

⁶⁹ Prominentes Beispiel ist das Lorenz-Experiment. Zwei Iterationsfolgen mit demselben Ausgangspunkt werden durchgeführt. Während des Vorgangs wird eine Ausgabe der zweiten Folge nach der 10. Iteration auf die ersten 3 Dezimalstellen abgeschnitten und als neue Eingabe für die Iteration verwendet. Bald nach diesem Eingriff verlieren die beiden Zahlenfolgen jegliche Übereinstimmung. Zitiert nach Hans-Otto Peitgen, Hartmut Jürgens, Dietmar Saupe, Bausteine des Chaos – Fraktale, Klett-Cotta/Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, S. 62

⁷⁰ https://de.wikipedia.org/wiki/Pierre-François_Verhulst

⁷¹ <http://www.adtractive.de/mazari/images/CHAOS>,
<http://www.jgiesen.de/Divers/ChaosVortrag/Chaos.pdf>

⁷² Siehe auch Kafitz, Willi, Oberhessische naturwissenschaftliche Gesellschaft, Band 66, Die Natur denkt fraktal, S.10

zwischen zwei Bifurkationspunkten gegen eine universelle Konstante strebt, der Feigenbaum-Konstante⁷³:

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{b_n - b_{n-1}}{b_{n+1} - b_n} = 4,6692016090\dots$$

Das Verhältnis der Abstände/Breiten ist ebenfalls universell.

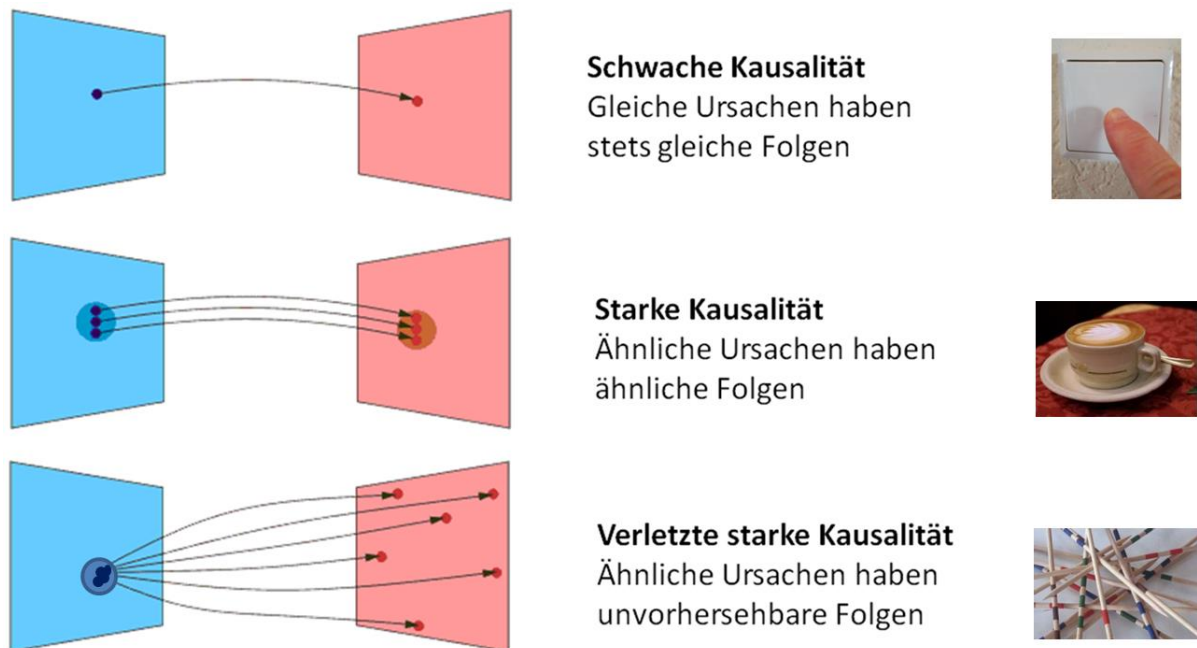


Abb. 10: Kausalitätsprinzipien

In der Natur, Chemie, Physik und Technik sind viele Prozesse bekannt, die zu sogenannten dissipativen Strukturen führen⁷⁴. „Dissipation“, lateinisch von Zerstreuung, ist ein makroskopischer Prozess, in dem (meist) durch Reibung die Energie in andere Formen der Energie umgewandelt wird. Z.B. bei den stationären dissipativen Strukturen, die bei gleichbleibenden äußeren Rahmenbedingungen im Gleichgewicht sind, kann man Formen der Selbstorganisation beobachten. Es findet dann keine Entropieänderung ΔS statt. Dabei ist das System nur äußerlich im Gleichgewicht. Es existieren aber

⁷³ Wikipedia.org, Suchwort Feigenbaum-Konstante.

⁷⁴ Wikipedia nennt ein schönes Beispiel aus der Thermodynamik: *Die Arbeit eines Ventilators leistet wegen der starren Systemgrenze keine Volumenänderungsarbeit, wird daher vollständig durch Reibung dissipiert.*

(<https://de.wikipedia.org/wiki/Dissipation>). In der Chemie kennt man Reaktionen, die für eine gewisse Zeit, bis die beteiligten Reagenzien verbraucht sind, verblüffende makroskopische, oft selbstähnliche, dissipative Phänomene zeigen (z.B. Belousov-Zhabotinsky-Reaktion).

nach wie vor innere Prozesse, die nicht im Gleichgewicht, also dynamisch sind⁷⁵. In diesen wächst die Entropie, es ist also ΔS_i positiv und wird ständig durch Wechselwirkung mit der Umgebung genau ausgeglichen ($\Delta S_i = -\Delta S_{\text{extern}}$). Um stabil zu bleiben, muss das System nach außen Entropie abgeben.

In der Chaos-Theorie werden die in diesem Kapitel genannten Phänomene (u.a.) untersucht. Wie an dem Beispiel von Peitgen et.al. verdeutlicht wird, sind die Gleichungen deterministisch. Deshalb wurde die Kapitelüberschrift gewählt. Doch es sei nochmals betont, dass erst winzige Änderungen der Anfangsbedingungen, wie sie etwa in der Praxis durch sehr leicht abweichende Startwerte entstehen und nicht der Zufall, im Laufe der Zeit zu nicht vorhersehbaren, chaotischen Entwicklungen führen können. In der Mathematik entsteht das Phänomen durch Iterationen, in der physikalischen Natur durch die stetige, zeitliche Entwicklung.

Deterministisches Chaos entsteht also bei nicht-linearen, dynamischen Systemen durch kleinste Änderungen der Anfangsbedingungen. Die Entwicklung des Systems beruht auf Rückkopplungsprozessen und verletzt im chaotischen Fall das starke Kausalitätsprinzip (siehe Abb. 10). Exakt gleiche Anfangsbedingungen führen natürlich zu gleichem Verlauf mit identischen Ergebnissen. In der Praxis ist diese Anforderung aber oft schwer oder gar unmöglich einzuhalten.

Die Entropieänderung ist dabei bei den mathematischen Beispielen über die Informationstheorie begründet und bei den physikalischen Beispielen über die Thermodynamik.

An dieser Stelle sei auf den Begriff „Fraktal“ verwiesen, ohne den die Chaostheorie unvollständig dargestellt würde. Er wurde von Benoit Mandelbrot geprägt⁷⁶ und verweist darauf, dass es oft sinnvoll ist, nicht nur in euklidischen Dimensionen zu denken (Punkt $\hat{=}$ Dimension 0, Linie $\hat{=}$ Dimension 1, Fläche $\hat{=}$

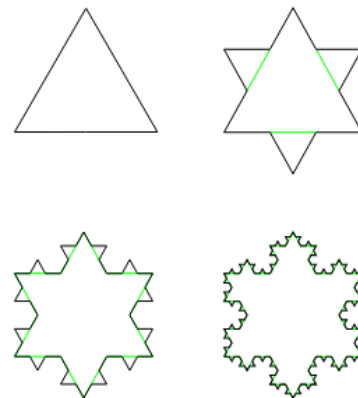


Abb. 11: Die ersten vier Iterationen der Koch-Flocke. Ihre Hausdorff-Dimension ist $\frac{\log 4}{\log 3} \approx 1,262$.

⁷⁵ Siehe ausführlich <https://www.pro-physik.de/restricted-files/114051>

⁷⁶ Mandelbrot, Benoit B., Die fraktale Geometrie der Natur, Basel, Boston, Birkhäuser 1987

Dimension 2, usw.)⁷⁷. Es gibt Formen in der Natur und in der Mathematik, bei denen es sinnvoll ist, gebrochene Dimensionen anzunehmen, d.h. Werte für die Dimension einer Struktur zuzulassen, die zwischen⁷⁸ den euklidischen Dimensionen liegen („Hausdorff-Dimension“). Fraktale entstehen mathematisch durch Iterationen von Funktionen und der grafischen Darstellung ihrer Ergebnisse. Sie sind selbstähnlich, also für mathematisch erzeugte Fraktale vollkommen skaleninvariant oder maßstabsunabhängig. In der Natur gilt dies zumindest in einem gewissen Bereich (Beispiel ganzer Blumenkohl zu Blumenkohlröschen).

In einem bahnbrechenden Artikel wurde prinzipiell gezeigt, dass bei allen Lebensformen, wo Stoffaustausch an Grenzflächen stattfindet (Tracheen der Insekten, Xylem bei Pflanzen, Lunge, Nieren bei Menschen und Säugetieren etc.) die fraktale Dimension bei maßstabsunabhängigem Volumen/Fläche ca. 2,25 beträgt⁷⁹.

Chaos und Fraktale ragen also tief in unsere Lebensgrundlagen. Der Entropiebezug entsteht, wenn man Chaos als Verlust von Information versteht (Mathematik) bzw. als energetischen Aufwand, um wieder zu einem Zustand höherer Ordnung zu kommen (Physik).

Fazit

Entropie als fundamentaler Aspekt, insbesondere in der Thermodynamik, wurde ursprünglich entwickelt, um im beginnenden industriellen Zeitalter wichtige Bereiche qualitativ und quantitativ beschreiben zu können. Doch das Erklärungspotential geht weit darüber hinaus. Die besondere Stärke von Entropie-Überlegungen erweist sich in der Informationstheorie, die unserem digitalen Zeitalter eine theoretische Basis gibt. Von grundlegender philosophischer Bedeutung ist Entropie bei der Zeit. Im Jahr 1927 postulierte Arthur Stanley Eddington, dass die Entropie den „Zeitpfeil“ (time's arrow) festlegt, also die Abfolge von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Mit Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie (ART) wurde zwar der Gegenwartsbegriff im wahrsten Sinne des Wortes relativiert. Aber

⁷⁷ Quelle der Grafik: <https://de.wikipedia.org/wiki/Koch-Kurve>

⁷⁸ Im Falle der Mandelbrot-Menge oder bei Hilbertschen Kurven, die eine Fläche vollständig überstreichen, ist die Hausdorff-Dimension sogar 2, während sie in euklidischer Dimension gleich 1 wäre.

⁷⁹ Geoffrey B. West, James H. Brown,* Brian J. Enquist,
A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology, SCIENCE,
VOL. 276 , 4th APRIL 1997, Seite 122-126
Maßstab oder Messgröße kann CO₂-Verbrauch bzw. O₂-Erzeugung bei Pflanzen oder der Grundumsatz in J/s bei Tieren sein.

jahrzehntelang hatte Eddington's These unwidersprochen Bestand und kann immer noch viele irreversible Prozesse einfach erklären. Ebenfalls grundlegend sind entropische Überlegungen in der extraterrestrischen Physik und Kosmologie. Der Nobelpreis für Physik im Jahr 2020 unterstreicht die Bedeutung von Schwarzen Löchern im Kosmos. Eventuell kann die Entropie das große Rätsel lösen, wieso auf großen Skalen sich Galaxien anders verhalten, als klassische Gravitationstheorien vorhersagen. Es ist unbefriedigend, dazu eine Materieform annehmen zu müssen, von der wir nicht im Geringsten wissen, was sie ist. Entropie ist als extensive, quantitativ bestimmbare Zustandsgröße, in vielen Anwendungsbereichen auch außerhalb der klassischen Thermodynamik nützlich, um berechenbare Aussagen machen zu können.

Literaturhinweise

Bekenstein, Jacob D., Spektrum der Wissenschaft, 11/2003,
<https://www.spektrum.de/magazin/das-holografische-universum/830304>

Ebeling, W. et. al, Komplexe Strukturen: Entropie und Information, Teubner, Stuttgart/Leipzig 1998

Eddington, Arthur Stanley, Das Weltbild der Physik und ein Versuch einer philosophischen Deutung, Englisch 1928, in Deutsch 1931, Springer

Energie und Entropie, Die Physik des Naturwissenschaftlers. Eine Einführung in die Thermodynamik, Autoren: Falk, G., Ruppel, W.

Fiedler, Hellmut, Chemisches Rechnen, Verlag Chemie, 1970

Friebe, Cord; Kuhlmann, Meinard; Lyre, Holger, Näger; Paul; Passon, Oliver; Stöckler, Manfred; Philosophie der Quantenphysik, Springer Spektrum, Heidelberg 2015

Gell-Mann, Murray (1994): Das Quark und der Jaguar, Piper, 1996

Greene, Brian: Der Stoff, aus dem der Kosmos ist. Siedler, München 2004

Großmann, Siegfried, Thomae, Stefan: Invariant distributions and stationary correlation functions of one-dimensional discrete processes. In: Zeitschrift für Naturforschung A. 32, 1977, S. 1353–1363

Digital siehe http://zfn.mpg.de/data/Reihe_A/32/ZNA-1977-32a-1353.pdf

https://www.blogs.uni-mainz.de/fb05-sachbuchforschung/files/2015/07/Oels_Zu_Snow_Zwei_Kulturen.pdf

<http://www.chemie.de/lexikon/Entropie.html>

<http://www.spektrum.de/news/holografisches-helium-aehnelt-schwarzen-loechern/1441880>

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/theorie/entropie/>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bekenstein-Hawking-Entropie>

https://de.wikipedia.org/wiki/Entropische_Gravitation

Jürgens, Hartmut, [Vorr.], Chaos und Fraktale, Artikelsammlung, Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1989

Kafitz, Willi, Symmetrie, Oberhessische naturwissenschaftliche Zeitschrift, Band 67, S. 84 und Anm. 125

Keynes, John Maynard: The General Theory of Employment Interest and Money, New York 1935

Kolmogorow-Komplexität (Spektrum der Wissenschaft, 9:2017, S. 77)

Mandelbrot, Benoit B., Die fraktale Geometrie der Natur, Basel, Boston, Birkhäuser 1987

Muller, Richard A., JETZT – Die Physik der Zeit, deutsche Ausgabe S. Fischer Verlag 2018, Frankfurt am Main

Pagel, Lienhard; Information ist Energie, Springer, Wiesbaden 2013

Peitgen, Heinz-Otto; Jürgens, Hartmut; Saupe, Dietmar; Bausteine der Ordnung Fraktale, Springer Verlag / Klett Cotta, 1992

Peitgen, Heinz-Otto; Jürgens, Hartmut; Saupe, Dietmar; Chaos Bausteine der Ordnung, Springer Verlag / Klett Cotta, 1994

Rovelli, Carlo, Die Ordnung der Zeit, Rowohlt 2018

Schwichtenberg, Jakob, Durch Symmetrie die moderne Physik verstehen, Springer Spektrum, Berlin 2017

Sedlacek, Klaus-Dieter, Äquivalenz von Information und Energie, Books on Demand (BoD), Norderstedt 2017

Smolin, Lee, Im Universum der Zeit, Deutsche Verlagsanstalt, 2014

Smolin, Lee, Quantenwelt, Deutsche Verlagsanstalt, 2019

Snow C.P., „Die zwei Kulturen. Rede Lecture, 1959“, in „Die zwei Kulturen. Literarische und naturwissenschaftliche Intelligenz“. C.P. Snows These in der Diskussion, hg. v. Helmut Kreuzer, München 1987, S. 30. Zitiert nach Richard A. Muller, JETZT – Die Physik der Zeit, deutsche Ausgabe S. Fischer Verlag 2018, Frankfurt am Main, S. 134

Susskind, Leonhard; Der Krieg um das Schwarze Loch, Suhrkamp, Berlin 2010

Wheeler, John Archibald, The Search for Links, posthum neu veröffentlicht in <https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf>

Zeh, H. Dieter: Entropie. Fischer, 2005

Abbildungsnachweise:

- Abb. 1 <https://www.gograph.com/de/clip-art-vektorgrafiken/kanister.html>
https://de.freepik.com/freie-ikonen/auto_694879.htm (beide lizenzfrei)
- Abb. 2 erstellt vom Autor, inspiriert von <https://www.uni-bremen.de/kooperationen/uni-schule/lehrkraefte/fundamentale-fragen-der-physik/entropie-und-grundlagen-statistischer-physik>
- Abb. 3 erstellt vom Autor
- Abb. 4 erstellt vom Autor
- Abb. 5 Quelle der Grafik: John A. Wheeler, The Search for Links, <https://philpapers.org/archive/WHEIPQ.pdf>, S.312
- Abb. 6 erstellt vom Autor
- Abb. 7 Wikipedia, Bild: Johannes Schneider, Lizenz: CC BY-SA 4.0, aus http://www.andromedagalaxie.de/html/galaxien_dunkle_materie.htm
- Abb. 8 erstellt vom Autor
- Abb. 9 erstellt vom Autor
- Abb. 10 erstellt vom Autor
- kleine Bilder: Lichtschalter eigenes Foto, Kaffeetasse, Mikado, Quelle: Wikipedia
- Abb. 11 <https://de.wikipedia.org/wiki/Koch-Kurve>

Danksagung

Herr Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Siegfried Großmann ist eine lebende Legende unter den deutschen Physikern und genießt hohen nationalen und internationalen Ruf. Er kann als einer der wichtigsten Vertreter der

statistischen Physik bezeichnet werden und gilt als Pionier und Begründer der noch relativ jungen Chaosforschung. Die Liste seiner Ehrungen ist lang und in seinem hohen Alter ist er noch in zahlreichen hochkarätigen Gremien vertreten und deren Mitglieder suchen seinen Rat. Ich bin sehr stolz, dass er die Aufgabe übernommen hat, mir bei dem vorliegenden Beitrag zur Seite zu stehen. Er war viel mehr Mentor als Gutachter. Seine sehr sorgfältigen, fast akribischen Verbesserungsvorschläge haben dem Text stilistisch und inhaltlich sehr gut getan. Ich bin ihm zu großem Dank verpflichtet.

Herr Dr. Michael Serafin hat wieder deutlich mehr getan, als er in der Funktion als Schriftleiter der Oberhessischen naturwissenschaftlichen Zeitschrift tun müsste. Ich weiß nicht, wo die altehrwürdige Gesellschaft ohne seine unspektakuläre, aber unermüdliche Tätigkeit stehen würde. Er hatte immer ein offenes Ohr für mich und hat konsequent gehandelt, wenn die Zeit für konkrete Schritte reif war.

Faksimile

*Einstweilen sitze ich an meinem letzten Vorlesungsbande und muss mich oft des Diktums von Ihnen erinnern, dass Sie auch nichts von Thermodynamik verstehen.
Möge das neue Jahr uns und der Welt gnädig sein!
Ihre getreuer
A. Sommerfeld.*

Brief von Arnold Sommerfeld an Wolfgang Pauli vom 6. Januar 1951; aus: Wolfgang Pauli und Karl von Meyenn (ed.); Wissenschaftlicher Briefwechsel Bd. 4/Teil 1 mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. 1950-1952. Springer-Verlag: Berlin 1996⁸⁰

Text: *Einstweilen sitze ich an meinem letzten Vorlesungsbande und muss mich oft des Diktums von Ihnen erinnern, dass Sie auch nichts von Thermodynamik verstehen.*

Danke an Frau Anita Hollier, RCS-SIS-AR / CERN Archive, (im Namen des Pauli Committee) für die freundliche Genehmigung zum Nachdruck.

⁸⁰ Danke auch an Christian Blöss für die Idee, sowie Danke an Dr. Michael Eckert vom Deutschen Museum (München) für die Vermittlung des Kontakts zum CERN-Archiv.

Nachruf

Professor Dr. Ernst Ludwig Sattler



Foto: Archiv JLU-Pressestelle

Am 14. Juni 2020 ist Professor Dr. Ernst Ludwig Sattler im Alter von 92 Jahren verstorben.

Ernst Ludwig Sattler begann 1947 ein Studium der Naturwissenschaften an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und wurde dort 1956 zum Dr. phil. nat. promoviert. Daran anschließend wurde er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt. Im Jahr 1962 wurde er an der Justus Liebig-Universität Gießen zum Wissenschaftlichen Assistenten ernannt. In den folgenden Jahren war er als Kustos und später als Akademischer Oberrat am Institut für Biophysik im Strahlencentrum tätig. Im Oktober 1972 wurde er zum

Professor an der Justus Liebig-Universität Gießen ernannt, wo er bis zu seiner Versetzung in den vorzeitigen Ruhestand im Jahr 1992 lehrte und forschte.

Professor Sattler war maßgeblich am Aufbau des Strahlencentrums beteiligt und dort als kommissarischer Leiter der Zentralen Abteilung für biophysikalische und interdisziplinäre Aufgaben mit der Koordination und Betreuung der Forschungsvorhaben betraut. Mit Hingabe und Engagement brachte er sich zudem in die Planung und den Ausbau des Instituts für Biophysik ein. Er war ein begnadeter Lehrer und vermittelte insbesondere auch praktisches Wissen auf den Gebieten der Nuklear- und Radiochemie. Wissenschaftliche Anerkennung erlangte er insbesondere durch seine Arbeiten auf dem Gebiet der Inhalation radioaktiver Substanzen durch tierische Organismen. Darüber hinaus war er u.a. Mitglied der Deutschen Gesellschaft für Biophysik und der Senckenbergischen Naturforschenden Gesellschaft.

Professor Sattler hat sich in unserer Oberhessischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde vielfältig und kompetent engagiert. Nachdem er zunächst mehrere Jahre stellvertretender Vorsitzender war, übernahm er 1985 für zehn Jahre die Schriftleitung der Oberhessischen Naturwissenschaftlichen Zeitschrift. Danach war er lange Zeit im Beirat der Gesellschaft tätig. Unsere Gesellschaft wird Herrn Professor Ernst Ludwig Sattler stets ein ehrendes Andenken bewahren.

Prof. Dr. Gerd Meyer, Stockholm/Schweden

Dr. Michael Serafin, Gießen

**Kurzfassungen von Vorträgen, die in der Oberhessischen Gesellschaft
für Natur- und Heilkunde – Naturwissenschaftliche Abteilung –
gehalten wurden**

**Bienensterben, Insektensterben – Kann es gestoppt werden?
Wo liegen die Gefährdungen?**

Vortrag von **Herrn Dr. Ralph Büchler**, Leiter des Bieneninstitutes Kirchhain,
Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen LLH

am 12. Dezember 2017

In Deutschland existieren mehr als 500 verschiedene Bienenarten. Sie sind die wichtigsten Bestäuber von Blütenpflanzen und tragen daher erheblich zur Sicherung der Biodiversität bei. Jedoch sind die Lebensgrundlagen dieser Insekten vielerorts massiv bedroht und mehr als die Hälfte der Arten gelten daher inzwischen als hoch gefährdet, wenn nicht unmittelbar vom Aussterben bedroht.

Eine Sonderstellung nimmt die Honigbiene ein, die im Hinblick auf die Bestäubung von Nahrungspflanzen besonders bedeutsam ist und um deren Erhalt und Pflege sich zahlreiche Imker kümmern. Aber auch hier sind teilweise erhebliche Rückgänge zu verzeichnen und es ist in den letzten Jahren wiederholt zu großen Völkerverlusten gekommen. Die dafür verantwortlichen Ursachen sind vielfältig, aber eng mit der Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung und dem Einsatz von Pestiziden verbunden.

Neben Verbesserungen bei der Haltungstechnik und der Abwehr von Krankheitserregern müssen daher in enger Zusammenarbeit mit den Landwirten Wege zur Verbesserung des Habitat- und Nahrungsangebotes sowie zur Verringerung der Pestizidbelastung gefunden werden. Anhand neuer Untersuchungsergebnisse sollen relevante Faktoren genauer beleuchtet und mögliche Ansatzpunkte zur Verbesserung des Bienenschutzes aufgezeigt werden.

Dr. Ralph Büchler, Kirchhain

Speisepilze

Perspektiven für eine gesunde, aromatische und nachhaltige Lebensmittelversorgung

Vortrag von **Herrn Dr. Martin Rühl**, JLU Gießen

am 14. November 2018

Seit Jahrtausenden werden Pilze wegen ihres köstlichen Geschmacks sowie ihrer nutritiven und pharmakologischen Eigenschaften geschätzt. Eines der bekanntesten Beispiele ist der im Neolithikum lebende Ötzi, der 1991 als Mumie in den Ötztaler Alpen gefunden wurde. Er trug in seiner Gürteltasche zwei getrocknete Pilzfruchtkörper: den als Zunderschwamm bekannten *Fomes fomentarius* und den Birkenporling *Piptoporus betulinus*. Letzterer wird auch heute noch in einigen Bevölkerungsgruppen als Heilpilz bei Magenbeschwerden verwendet. Bis in die heutige Zeit sind die Fruchtkörper der Speisepilze aus der traditionellen chinesischen Medizin nicht wegzudenken und gehören hier - meist in getrockneter Form - in jede Hausapotheke. Daneben wurden Speisepilze für rituelle Zwecke im Schamanismus verwendet. Wurden Speisepilze früher traditionell gesammelt, gibt es heute für saprobionte Vertreter Kultivierungsverfahren, die es ermöglichen über das ganze Jahr hinweg Speisepilze zu züchten. Erste Versuche zur Kultivierung wurden vor ca. 1.000 Jahren in China durchgeführt. Hier wurde der als Shiitake bekannte Pilz *Lentinula edodes* auf gefällten Baumstämmen kultiviert, eine Technik die auch heute noch in Teilen Ostasiens angewendet wird. In Europa wurde vor gut 300 Jahren zum ersten Mal der Champignon (*Agaricus bisporus*) auf Pferdemist kultiviert. Vor gut 100 Jahren begann die Züchtung von Speisepilzen mit dem Austernseitling *Pleurotus ostreatus* in Hannoversch Münden durch Professor Richard Falk. Neben ihren ernährungsphysiologischen Vorteilen sind sie auch in der Pharmazie, der Agrarindustrie und der Lebensmittelindustrie als natürliche Ressource für unterschiedliche Naturstoffe, die in den verschiedenen Bereichen von Nutzen sind, vertreten.

Im Vortrag wurde ein Einblick über die Entwicklung der Speisepilzproduktion von traditionellen zu modernen Verfahren geben und die Vorbildfunktion dieser Art der Lebensmittelproduktion für eine ökologische Kreislaufwirtschaft betont. Daneben wurden verschiedene Bereiche aus der Speisepilzforschung vorgestellt.

Wie können Speisepilze Holz besiedeln? Durch ihr einzigartiges Enzymsystem besitzen viele Speisepilze die Möglichkeit die schwer abbaubaren Holzpolymere (Cellulose und Lignin) aufzuschließen und nutzbar zu machen.

Dabei ist vor allem die Fähigkeit, das braune Lignin durch Produktion und Sekretion bestimmter Oxidoreduktasen abzubauen, einmalig.

Wieso sind Speisepilze hervorragend für das Recycling geeignet? Mit Hilfe dieses Enzymsystems tragen Pilze zu einem erheblichen Teil zum Kohlenstoffkreislauf bei. Diese Fähigkeit kann auch beim Recycling anderer schwer abbaubarer Substanzen helfen. So wurden Kulturen des Austernseitlings bereits zur Beseitigung von chlorierten, aromatischen Kohlenwasserstoffen eingesetzt. Daneben ist es möglich Seitenströme der Lebensmittelindustrie durch gezielte Fermentation mit essbaren Pilzen in hochwertiges „Mykoprotein“ umzuwandeln.

Wie kommunizieren Speisepilze mit ihrer Umwelt? Die Art und Weise wie Pilze mit ihrer Umwelt kommunizieren ist weitgehend ungeklärt. Jedoch spielen flüchtige Verbindungen, die wir Menschen zum Teil als Geruch wahrnehmen können, eine große Rolle. So sind schwefelhaltige Verbindungen, wie sie die Stinkmorchel produziert, für Fliegen überaus anziehend, für uns dagegen eher abstoßend. Die Fliegen werden angelockt und helfen so die Sporen der Pilze zu verbreiten. Auch Schweine oder Hunde, die bei der Trüffelsuche eingesetzt werden, reagieren auf bestimmte Verbindungen, die diese hochpreisigen Speisepilze in sehr kleinen Mengen produzieren und von uns in dieser Konzentration nicht wahrgenommen werden können. Daneben gibt es auch wohlriechende Beispiele, wie das Pilzaroma Oct-1-en-3-ol, das für uns Menschen attraktiv, für manche Käfer aber eher abstoßend wirkt.

Was macht sie für unsere Forschung in der Lebensmittelchemie und Lebensmittel-Biotechnologie so interessant? Als Forschungsobjekte sind Speisepilze und andere Vertreter der Ständerpilze unterrepräsentiert. Gerade hier liegt ihr Vorteil, wenn man neue Substanzen entdecken, neue Enzymreaktionen beschreiben oder alternative Recyclingstrategien entwickeln möchte. Dieses Forschungsfeld zu erschließen, hat sich die Arbeitsgruppe von Herrn Dr. Rühl zur Aufgabe gemacht.

Dr. Martin Rühl, Gießen

Die Energiewende, eine kritische Analyse der Stromversorgung aus energietechnischer Sicht

Vortrag von **Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Rudolf Engelhorn**, ehem. Professor für Kältetechnik an der Fachhochschule Gießen-Friedberg, der heutigen Technischen Hochschule Mittelhessen

am 19. Juni 2019

In dem Vortrag wurden einleitend die Ursachen des Klimawandels dargelegt, als deren Konsequenz die Energiewende unumgänglich ist. Dominierend ist der zunehmende CO₂-Ausstoß. Hauptemittenten sind die USA, China und Russland. Der Anteil Deutschlands ist mit 2% nur gering, wovon 40% auf die Stromerzeugung entfallen, so dass diese insgesamt nur 0,8% ausmacht.

Das Ziel der Bundesregierung ist es, bis 2050 den Stromanteil an erneuerbaren Energien – bezogen auf 2014 - auf 80% zu erhöhen, die Primärenergiesenkung - bezogen auf 2008 - um 50%, und den Treibhausgasausstoß – bezogen auf 1990 - um 80 bis 95% zu senken.

Die gesicherte Stromerzeugung in Deutschland erfolgt zum überwiegenden Anteil durch Kohle- und Kernkraftwerke. Die regenerativen Stromerzeuger, wie Windenergie- und Fotovoltaikanlagen sind keine sicheren Stromlieferanten. Nach Abschaltung der Kernkraftwerke im Jahr 2022 und der Kohlekraftwerke bis 2038 besteht eine auf heute bezogene Versorgungslücke von mehr als 50%.

Im Vortrag kam zum Ausdruck, dass die Einhaltung der gesetzten Ziele mit den vorgesehenen Maßnahmen nicht möglich sein wird. Neben zu geringer Kraftwerkskapazität zählt hierzu das Fehlen von Energiegroßspeichern in Form von Pumpspeicherkraftwerken, um überschüssigen Strom aus der regenerativen Stromerzeugung aufzunehmen. Die Grenzen des Baus solcher Speicher ergeben sich einerseits durch die hiesige Geologie, d.h. dem Fehlen vieler und hoher Berge, andererseits des mit deren Bau verbundenen massiven Eingriffs in die Natur, dem sich erfahrungsgemäß auch die Bevölkerung entgegensetzt. Ähnlich verhält es sich mit dem großflächigen Ausbau von Onshore-Windenergieanlagen, mit der „Verspargelung“ der Landschaft und der Folge von Bürgerprotesten.

Ein teilweiser Ausgleich der fehlenden Kraftwerkskapazität könnte durch den Bau hocheffizienter Gaskraftwerke erfolgen, deren sinnvolle Anzahl jedoch dadurch begrenzt ist, dass auch diese CO₂ - wenn auch in wesentlich geringerer Menge als Kohlekraftwerke - ausstoßen. Letztlich böte sich als verbleibende Lösung die Wiederbelebung der Kernenergie an. Kernkraftwerke sind die einzige großtechnische Methode gesicherter Stromerzeugung, die ohne Erzeugung von CO₂ einhergeht. Die Konsequenz, hierauf zurückzugreifen, erscheint in Anbetracht der ungeheuren Bedrohungen durch den Klimawandel als gerechtfertigt.

Alle in Deutschland ergriffenen Maßnahmen ändern letztlich an der zu befürchtenden Klimakatastrophe nichts, wenn nicht alle Länder der Erde, vor allem die großen Emittenten, mitziehen. Dennoch sollte Deutschland seine Bemühungen fortsetzen, um Ansporn für andere Länder zu sein.

Auch eineinhalb Jahre nach dem Vortrag, beim Verfassen dieses Überblicks, Ende 2020, sieht sich der Verfasser in seinen Ausführungen bestätigt. Die sich zwischenzeitlich konkretisierenden Methoden, wie die Elektrifizierung des Verkehrs und die zentrale Bedeutung, die der Wasserstofftechnik als künftigem Energiespeicher und Brennstoff beigemessen wird, setzen das Vorhandensein derart großer Strommengen voraus, dass diese ohne Kernkraftwerke nicht verfügbar sein werden.

Prof. Dr.-Ing. Hans Rudolf Engelhorn, Butzbach

Humus: Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit, die Umwelt und das Klima

Vortrag von **Herrn Prof. Dr. agr. Thomas Appel**, Professor für Pflanzen-
ernährung und Bodenkunde an der Technischen Hochschule Bingen

am 11. Februar 2020

Die Bundesregierung hat im Klimaschutzprogramm 2030 unter dem Stichwort „Humuserhalt und Humusaufbau im Ackerland“ beschlossen, das Kohlenstoffspeicherpotenzial der Böden verstärkt zu aktivieren. Für die Landwirtschaft stellt sich deshalb die Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen, den Humusgehalt im Boden zu beeinflussen.

Im konventionellen Ackerbau ist der Humus vor allem wichtig, um ein krümeliges Gefüge des Bodens zu gewährleisten. Damit sind viele Vorteile verbunden: Weniger Verschlammung, leichtere Bearbeitung, höhere Wasserinfiltration, bessere Durchwurzelbarkeit. Besonders auf leichten Böden leistet der Humus zudem einen wichtigen Beitrag, um Nährstoffe in pflanzenverfügbarer Form an den Oberflächen der Krümel zu binden.

Das Krümelgefüge des Bodens wird von der toten organischen Substanz, dem Humus, nicht direkt geschaffen, sondern es entsteht durch die Organismen, die im Boden leben, und denen der Humus als Nahrung dient. Dabei wird dieser „Nährhumus“ abgebaut und der enthaltene Kohlenstoff als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt. Nur ein kleiner Rest verbleibt längere Zeit im Boden.

Die positive Wirkung des Humus für die Bodenfruchtbarkeit steht also in engem Zusammenhang mit seiner Zersetzung durch die Bodenorganismen. Für den Klimaschutz ist die Situation allerdings umgekehrt, je weniger die dem Boden zugeführte organische Substanz den Bodenorganismen als Nahrung dient, umso länger bleibt der Kohlenstoff im Boden gebunden.

In dem Vortrag wurden die Möglichkeiten und Grenzen beleuchtet, den Kohlenstoff im Boden in Form von Humus zu mehren.

Prof. Dr. agr. Thomas Appel, Bingen