

# **Entropie-Wende**

Michael Köhler

Ilmenau 2019

# Impressum

URN: <urn:nbn:de:gbv:ilm1-2019200424>

DOI: [10.22032/dbt.39378](https://doi.org/10.22032/dbt.39378)

© 2019 Michael Köhler, Technische Universität Ilmenau (Thür.)

Lizenzpartner: Technische Universität Ilmenau  
Universitätsbibliothek / [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
Deutschland

[www.tu-ilmenau.de/ilmedia](http://www.tu-ilmenau.de/ilmedia)

# Inhalt

Danksagung .....	V
Einleitung .....	1
Teil I: Bedeutung der Entropie in der Thermodynamik und der Physikalischen Chemie .....	4
Rudolf Clausius .....	4
Strukturverlust.....	5
Triebkräfte .....	10
Wilhelm Ostwald .....	11
Ludwig Boltzmann .....	13
Die Boltzmann-Konstante .....	15
Prozessgeschwindigkeiten .....	17
Svante Arrhenius und die Arrhenius-Gleichung.....	18
Universalität physikalisch-chemischer Naturbetrachtung durch Svante Arrhenius.....	20
Informationsmanagement und Wärmelehre.....	22
Teil II: Entropie und Evolution.....	25
Der Zeitpfeil.....	25
Dissipative Strukturen .....	34
Autopoesis und Gaia-Hypothese.....	36
Die Erde als getriebenes System .....	38
Entropie, Information und Evolution .....	44
Evolution der Systeme zur Akkumulation und zum Austausch von Informationen .....	45
Kosmische Evolution .....	55
Teil III: Entropie und Umwelt .....	60
Zeitskalen der Kohlenstoffkreisläufe.....	60
Zeitskalen der Atmosphären und Klima-Entwicklung .....	62
Entropieexport in der industriellen Materialwirtschaft.....	70

Kleinteiliges Produkt- und Material-Design .....	76
Nachhaltigkeit und Zeitskalenanpassung.....	79
Nachhaltiger Entropie-Export in der Landwirtschaft .....	80
Teil IV: Entropie-Export und „Werkstoff-Wende“ .....	82
Die Rolle der Landwirtschaft in der „Werkstoff-Wende“ .....	82
Biosolar-Wirtschaft.....	83
Bioagrarische Konversion und Reduktion in der Werkstoffwende .....	85
Landwirtschaft als Schlüsselinstrument für geschlossene Stoffkreisläufe .....	87
Aqua-Agrarwirtschaft .....	87
„Metal-Aqua-Farming“ .....	88
Ökologische Einbettung .....	90
Coevolutives Potenzial technisch-ökologischer Systeme .....	91
Integration des Informationswertes ruhender Lebensformen.....	93
Agrarische Mosaiklandschaft und langfristiger Schutz- und-Nutz-Wechsel.....	94
Mineralisches Potenzial, Boden-Nährstoff-Haushalt und Nährstoff-Akkumulation.....	96
Management des evolutiven Bodenpotenzials.....	98
Hierarchische Flächengliederung und die Skalenlücke im Meterbereich.....	101
Teil V: Transformation und kulturelle Kontinuität.....	103
Wille zum globalen Handel.....	103
Fähigkeit zum globalen Handeln .....	107
Verpflichtung zur Vorsorge: Entropieexport-Reserven.....	109
Die Übergangsphase zur Nachhaltigkeit .....	113
Anmerkungen und Literatur .....	115
Abbildungsverzeichnis .....	117

## **Danksagung**

Für die kritische Durchsicht des Manuskriptes und viele wichtige Hinweise danke ich ganz herzlich Andrea Knauer, Ilmenau und Reinhard Guthke, Jena.

## Einleitung

Es gehört zu den elementaren Fähigkeiten des Menschen, eigene Fehler zu erkennen und zu korrigieren. Das betrifft nicht nur die einzelne Person, sondern auch Gesellschaften und letztlich auch die Menschheit als Ganzes. Das Lernen aus Fehlern ist eine der grundlegenden Eigenschaften aller lebenden Systeme. Populationen – gleich welcher Art – die nicht in der Lage sind, Fehlverhalten zu korrigieren gehen unter, solche, die Fehler effektiv korrigieren, bleiben bestehen. Die Maxime „Aus der Vergangenheit für die Zukunft lernen“ ist nicht auf den Menschen beschränkt, sondern umschreibt das evolutionäre Prinzip von Variation und Selektion in der ganzen lebenden Natur.

Ohne bewusstes Handeln gelingt dieses Lernen nur dadurch, dass unterschiedliche Entscheidungen ausprobiert werden, und anschließend – je nach Erfolg – eine Selektion stattfindet. Individuen einer Population sind unterschiedlich genetisch ausgestattet und verhalten sich unterschiedlich. Sie tragen das Risiko mangelhaft angepasst zu sein, sich falsch zu verhalten und unterzugehen. Dagegen überlebt die Population, wenn sie eine hinreichende Variationsbreite in den Eigenschaften und Verhaltensweisen ihrer Glieder zulässt. Das Risiko für den einzelnen ist die Chance für die Population.

In einer ethisch bestimmten, solidarischen, menschlichen Gesellschaft wird das Prinzip der Variation und Selektion von der Ebene der einzelnen Menschen, der Individuen, auf die Ebene der Ideen, der Werteskalen, der Gesetze, der Wirtschaft, der Politik und Kultur verlagert. Dadurch verliert die Gesellschaft die für die biologische Evolution typische Möglichkeit der Anpassung durch Selektion von Individuen. Der archaische biologische Mechanismus der zufälligen Variation von Eigenschaften und Verhaltensweisen und der automatischen Durchsetzung des erfolgreicherer Individuums und der erfolgreicherer Gruppe wird überwunden. An seine Stelle treten die Variation und der Wettbewerb von Ideen und Modellen, Moralvorstellungen und Erfindungen. Damit werden das Selektions- und damit das Untergangsrisiko des einzelnen Menschen minimiert. Um diesen Zustand aufrechtzuerhalten, müssen sich Ideen, Wertmaßstäbe, Gesetze und Wirtschaftsweisen durchsetzen, die nicht nur den erfolgreichsten Gruppen, Völkern und Staaten nutzen, sondern den Fortbestand der gesamten Menschheit sichern. Das setzt natürlich die Einsicht in globale Fehlentwicklungen und die kollektive Fähigkeit und die kollektive Absicht zur Korrektur voraus.

So hat sich in den letzten Jahren immer deutlicher gezeigt, dass die massive globale Nutzung fossiler Energieträger problematisch und für das Klima und die Stabilität lebensfreundlicher Verhältnisse auf der Erde gefährlich ist. Deshalb soll es zur Energiewende kommen, die zu einer vollständig nachhaltigen Bereitstellung von Energie auf der Erde führen soll. Eine Korrektur von Fehlern mit globalen Auswirkungen ist keine Illusion. Der Umgang mit dem Ozonloch ist ein ermutigendes Beispiel für die Menschheit, auch globale ökologische Fehlentwicklungen korrigieren zu können.

Zum Beispiel hat das weltweite Verbot von Fluorchlorkohlenwasserstoffen in der Massenanwendung deren zerstörende Wirkung auf unseren atmosphärischen UV-Schutzschild bremsen können, und es darf erhofft werden, dass die Stratosphäre sich in den nächsten Jahrzehnten allmählich regenerieren wird.

Weltweit werden wirtschaftliche, politische und wissenschaftlich-technische Anstrengungen unternommen, um die bisher weitgehend nicht-nachhaltige Energieerzeugung durch umweltfreundliche, nachhaltige Prozesse abzulösen. Auf der einen Seite wird die Gewinnung fossiler Energieträger immer aufwändiger und risikoreicher, auf der anderen Seite führt die Nutzung von Kohle, Erdöl und Erdgas zur immer weiteren Anreicherung von Kohlendioxid in der Atmosphäre und damit zu wachsenden Gefahren, die mit einem verstärkten globalen Treibhauseffekt verbunden sind.

Der Verbrauch der fossilen Energieressourcen und die Freisetzung von Treibhausgasen stehen in einem kausalen Zusammenhang. Sie sind die beiden Seiten ein und derselben Medaille. Die stoffliche Umwandlung von Kohle, Erdöl und Erdgas in Verbrennungsprodukte ist die notwendige Voraussetzung für die Produktion von Elektroenergie aus chemischer Energie und ihre Nutzung in Form von Treibstoffen. Der Erste Hauptsatz der Thermodynamik verlangt, dass Energie sich nicht aus dem Nichts erschaffen lässt, sondern nur umgewandelt werden kann. Im Falle der fossilen Energieträger wird die in den Lagerstätten gespeicherte chemische Energie in einem wärmefreisetzenden, d.h. „exothermen“, Prozess nutzbar gemacht und in thermische, kinetische und elektrische Energie umgewandelt. Ohne Energiequellen lässt sich keine Energie bereitstellen. Die fossilen Energieträger sind seit rund zwei Jahrhunderten die dominierenden Energiequellen. Ihnen verdanken wir die Entwicklung der Industriegesellschaft und den heutigen hohen mittleren Lebensstandard in den Industriegesellschaften. Der Preis für ihre Nutzung sind die Ausbeutung der Lagerstätten und die exzessive Kohlendioxidfreisetzung in die Atmosphäre.

Einen Ausweg scheinen Verfahren zu bilden, die sogenannte erneuerbare Energiequellen nutzen. Wasserkraft, Wind- und Sonnenenergie zählen ebenso dazu wie die Energieerzeugung aus Klärgasen und landwirtschaftlich produzierter Biomasse. Direkt oder indirekt sorgt die Sonnenstrahlung für die Bereitstellung dieser Energie. Auch bei der Energieerzeugung aus Wind, Wasserkraft und Biomasse ist die Energieerzeugung an den aktuellen Energiefluss von der Sonne angekoppelt. Die Sonne treibt die atmosphärische Konvektion und ist damit Ursache des Windes. Sie lässt Meerwasser verdampfen, so dass sich Wolken bilden können, die – vor allem in Gebirgen – abregnen und Flüsse und Stauanlagen speisen, und sie versorgt die grünen Pflanzen mit Licht für die Photosynthese. In all diesen Prozessen stammt die Energie indirekt, aber ebenfalls kurzfristig, von der Sonne. Bei diesen Vorgängen ist die Energiewandlung eng an stoffliche Vorgänge gekoppelt. Lediglich in Photovoltaik-Solaranlagen wird elektrische Spannung direkt aus der absorbierten Lichtenergie der Sonnenstrahlung erzeugt. Eine alternative Energiequelle stellt Wärme aus dem Erdinneren dar, deren Entstehung im Wesentlichen auf natürlichen Kernprozessen und Gezeitenkräften beruht. Die wirtschaftlich sinnvolle Nutzung der „Geothermie“ setzt größere

Temperaturunterschiede und vergleichsweise rasche Wärmeübertragungsprozesse zwischen dem lokalen Wärmereservoir in der Erdkruste und der Atmosphäre voraus, eine Bedingung, wie sie z.B. in vulkanisch aktiven Gebieten erfüllt wird.

Der Aufwand zur Errichtung von Windrädern, Solaranlagen und Wasserkraftwerken ist beträchtlich, deren Betrieb ist jedoch weniger kosten- und personalaufwändig. Oft sind diese Anlagen mit Umweltbelastungen verbunden – Bürgerproteste gegen neue Talsperren, Stromtrassen und Windanlagen machen es deutlich – und außerdem sind sie erst in jüngster Zeit (2019) wirtschaftlich mit dem Neubau von Anlagen der fossilen Stromerzeugung konkurrenzfähig, deren indirekte Kosten für Umwelt und Gesundheit bei Rentabilitätsrechnungen in der Regel ausgeklammert werden. Die umfangreiche Errichtung von Windkraftanlagen trieb in den Jahren 2000 bis 2017 die Strompreise in Deutschland über die EEG-Umlage in die Höhe. Andererseits trugen sie zum Fallen des Strompreises an der Strombörse bei.

Und so bedeutet Energiewende nicht nur den Ausbau neuer und alternativer Energieerzeugungsanlagen, sondern auch ein Umdenken zu Energie- und Energiewandlung: Gehen wir mit Energie richtig um? Bleibt Energie grundsätzlich erhalten? Wie hängen Stoff- und Energiewandlung zusammen? Wie weit heizt sich die Erde allmählich auf? Können wir die Abwärme bei der Energieerzeugung nutzen? Was passiert mit der Wärme, in die schließlich alle Energie gewandelt wird? Warum kann Energie überhaupt gewandelt werden? Wie funktioniert die Energiewandlung in der Energieproduktion, wie beim Energieverbrauch?

Diese Fragen schließen zahlreiche naturwissenschaftliche und technische Einzelprobleme ein. Es gibt aber eine zentrale thermodynamische Größe, die alle diese Probleme miteinander verbindet. Das ist die Entropie.



# Teil I: Bedeutung der Entropie in der Thermodynamik und der Physikalischen Chemie

## Rudolf Clausius

Rudolf Clausius wurde 1822 in Köslin geboren [1]. Er entstammt einer sehr kinderreichen Familie. Obwohl er 17 Geschwister hatte, konnte er das Gymnasium in Stettin besuchen und ab 1840 in Berlin Physik und Mathematik studieren. Zunächst arbeitete er als Gymnasiallehrer und promovierte 1848 über die Theorie des Regenbogens. Schon kurz danach stand die Thermodynamik im Mittelpunkt seines Interesses. So entdeckte er bereits 1850, dass die Umwandlung von Wärme in Arbeit allein von den Temperaturen der Stoffe abhing, die die Wärme aufnehmen bzw. abgeben, nicht jedoch von den sonstigen Stoffparametern. Die Beschäftigung mit der Richtung des Ablaufs von Kreisprozessen führte ihn schließlich 1865 zur Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und zur Einführung einer neuen zentralen thermodynamischen Größe, der Entropie.

Clausius hatte entdeckt, dass Wärme-Energie nicht ohne zusätzlichen Aufwand von einem niedrigeren auf ein höheres Energie-Niveau angehoben werden kann, dass also die Richtung eines spontanen Wärmeübergangs festgelegt ist, und damit der Wärmeübertragungsprozess ein Vorgang ist, der gegenüber der Zeitachse nicht symmetrisch ist. Seine neue Größe, die Entropie, erlaubte eine quantitative Beschreibung dieser Asymmetrie. Clausius nutzte diese Größe zur Formulierung des Zweiten Hauptsatzes: „Die Entropie kann in einem System nur abnehmen, wenn in einem anderen System die Entropie um mindestens den gleichen Betrag zunimmt.“ Aus diesem Sachverhalt folgt unmittelbar die Aussage, dass in einem abgeschlossenen System die Entropie zwar zunehmen, aber niemals abnehmen kann.

Clausius erkannte die universelle Bedeutung seiner Entdeckung. Er begriff, dass seine Beobachtung zur Richtung des Wärmeübergangs und die Einführung der Entropie Ausdruck von irreversiblen Vorgängen sind und dass die Prozesse in der Natur deshalb einen Richtungssinn besitzen. Dieses Erkenntnis gipfelte in der Übertragung auf einen Zeitpfeil für die Entwicklung des Kosmos' als Ganzem: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“

Die Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik und die Beschreibung der Entropie standen in engem Zusammenhang mit Clausius' Arbeiten über die Bewegung von Teilchen im Gasraum. Clausius war ein überzeugter Anhänger der Atomtheorie, die damals in Fachkreisen noch keineswegs unumstritten war. Er sah, dass mit dem Teilchenmodell des Aufbaus der Materie deren

thermodynamische Eigenschaften auf elementare mechanische Gesetze zurückgeführt werden konnten. Der Beschäftigung mit diesem Thema entsprangen auch Überlegungen zum Dampfdruck von Flüssigkeiten und die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des Dampfdrucks, die schließlich zur Formulierung der Clausius-Clapeyronschen Gleichung führten.

Rudolf Clausius trug am 7. November 1870 seine fundamentalen Überlegungen zu den mechanischen Grundlagen der Gastheorie in der niederländischen Gesellschaft für Natur und Heilkunde vor und publizierte sie 1871 als schriftlichen Beitrag in Poggendorfs Annalen. Zu diesem Zeitpunkt kannte er offensichtlich nicht die bereits 1866 vom jungen Ludwig Boltzmann veröffentlichte Begründung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik durch die Prinzipien der analytischen Mechanik. Beide Physiker waren unabhängig voneinander auf diesen Zusammenhang gestoßen, und Rudolf Clausius hat die Priorität Boltzmanns, die dieser nach seiner Veröffentlichung beanspruchte, anerkannt.

Grundlage für Clausius' Konzept war die Verknüpfung atomistischen Denkens mit der Thermodynamik, speziell mit der quantitativen Analyse des Wärmeübergangs. Dem entsprach die konsequente Verknüpfung von Makrokosmos und Mikrokosmos. Die Vorstellungen zum atomaren Aufbau der Stoffe hatten zur damaligen Zeit noch einen ziemlich hypothetischen Charakter, da bis dahin weder direkte experimentelle Analysen zur atomaren Struktur der Materie, noch mikroskopische Abbildungen der Materiebausteine möglich waren, wie wir sie heute nutzen. Die Verbindung von Mikrokosmos und Makrokosmos im Denken von Rudolf Clausius bedeutete aber auch die klare Vorstellung von der universellen und skalenunabhängigen Gültigkeit der grundlegenden physikalischen Gesetze. Nur mit dieser Überzeugung ließen sich die in der makroskopischen Welt empirisch gewonnenen Erkenntnisse auf das atomistische Modell des Mikrokosmos übertragen. Zugleich bedeutete die Anerkennung der Universalität der physikalischen Gesetze aber im Umkehrschluss auch die Einsicht, dass die Vorgänge im Mikrokosmos den Prozessablauf im Makrokosmos bestimmen, dass die makroskopisch messbaren Größen wie Wärme, Temperatur und Entropie Ausdruck des Verhaltens großer Ensembles von kleinen Teilchen sind. Mit der mechanischen Begründung des Zweiten Hauptsatzes wurde klar, dass die Entropie nicht nur eine zentrale thermodynamische Größe ist, sondern zugleich auch aus den Gesetzen der Statistik abgeleitet werden kann. Die Art und Weise, wie die Bestandteile der Materie miteinander interagieren, unterliegt den Gesetzen der Mathematik.

## **Strukturverlust**

Der Untergang und die Neubildung von Strukturen sind alltägliche Erscheinungen, die sich in vielen Prozessen in der Industrie und im Alltag beobachten lassen. Dabei dürfen die Bildung und das Verschwinden von Strukturen nicht als spiegelbildliche Vorgänge verstanden werden (Abb. 1).



Abb. 1 Entropie-Zunahme durch Strukturabbau: Auflösung von Salz oder Zucker in einem Wasserglas

Zur Illustration wird im Folgenden ein einfaches Beispiel für das Verschwinden einer Struktur in einem technischen Prozess beschrieben. Riesige Anzahlen kleiner Körnchen von Kalkstein, Soda und kleine Quarzkristalle werden gemischt und erhitzt. Die Kristalle berühren sich, und wo das Material in Kontakt kommt, beginnt es zu kleben und dann aufzuschmelzen. Blasen steigen auf, und die festen Körner werden zu Bestandteilen einer breiartigen trüben Masse. Allmählich wird diese zähe Masse klarer und beweglicher. Zuletzt lösen sich die Kerne der Quarzkristalle in der inzwischen gebildeten Flüssigkeit auf. Aus kleinen Festkörpern von Siliziumdioxid, Soda und Calciumcarbonat ist eine Glasschmelze geworden. Die Glasmacher bringen diese Schmelze – oft mit weiteren Zusätzen – in Formen und Funktionen: Fensterscheiben und Haushaltsgegenstände, Glasrohre, Ampullen, Laborglas und vieles andere. Das Erhitzen und Aufschmelzen der Ausgangsmaterialien ermöglicht diesen Fertigungsprozess und damit die Erzeugung nützlicher und ästhetischer Strukturen. Damit eine solche Formgebung möglich ist, müssen jedoch vorher vorhandene

Strukturen untergehen. Die vorher separierten Ausgangsstoffe haben sich auf atomarer Ebene in der Glasmatrix verteilt. Das haben die Atome spontan getan, nachdem sie zusammengebracht und soweit erwärmt wurden, dass sie eine ausreichende Beweglichkeit erhielten. Nach dem Aufschmelzen sorgte allein diese spontane Bewegung, die Brownsche Molekularbewegung, für das Verschwinden der räumlichen Anordnung in den vorher vorhandenen Kristallen, für eine Durchmischung der vorher separierten Silizium-, Calcium- und Natriumatome.

Der Übergang von der regelmäßigen Anordnung der Atome in den Kristallgittern zur weitgehend zufälligen Anordnung der Atome im amorphen Glas bildet den Hauptbeitrag zur Triebkraft dieses Prozesses. Er entspricht dem Verlust an Ordnung in den Kristallgittern und kann durch eine Zunahme der Entropie charakterisiert werden. Bei tiefen Temperaturen, wenn die Kristalle stabil nebeneinander vorliegen, herrscht ein Zustand niedrigerer Entropie. Nach dem Aufschmelzen und gegebenenfalls dem folgenden Erstarren liegt in der Glasschmelze bzw. im Glas ein Zustand höherer Entropie vor. Das beschriebene Stoffsystem folgt beim Aufschmelzen – wie nicht anders zu erwarten – dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der sich hier in folgender Formulierung am besten wiederentdecken lässt:

In einem abgeschlossenen System nimmt die Entropie niemals ab. Spontane Veränderungen im System sind zwangsläufig an eine Zunahme der Entropie gekoppelt.

Menschliche Aktivitäten – technische wie natürliche – sind praktisch ausnahmslos an den Abbau von Strukturen auf der Ebene der elementaren Bausteine der Materie, der Atome und Moleküle, gebunden. Um makroskopische Strukturen aufzubauen und zu erhalten, müssen mikroskopische Strukturen zerstört werden. Beispiele dafür lassen sich schon im Alltag überall finden: Kristall-Ordnung wird z. B. abgebaut und Stoffe werden verteilt, wenn Kochsalz im Kartoffelwasser oder Zucker im Tee aufgelöst werden. Damit der Reifen mit guter Haftung über die Straße rollt, wird Kautschukmaterial in Form von Kohlenwasserstofffragmenten von der Reifenoberfläche auf die Straße übertragen. Zum Geschirrspülen, Hände- oder Wäschewaschen wird Seife aufgelöst und in Form der Seifenlösung in die Kanalisation – oder im ungünstigeren Fall direkt in die Umwelt – abgegeben.

Auch unsere Ernährung ist ein solcher Prozess. Die in den Pflanzen in Form von Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen gespeicherte Energie wird von uns zum Leben benötigt. Die Zerstörung der Pflanze als Struktur und der Abbau ihrer Bestandteile bis herab zu kleinen Molekülen wie Wasser und Kohlendioxid ist ein überlebensnotwendiger Vorgang. Mit unserer Atmung wird schließlich der Kohlenstoff, der vorher in Form organischer Verbindungen Blätter, Wurzeln und Früchte aufgebaut hatte, als Kohlendioxid nach außen abgegeben und in der Atmosphäre verteilt. Die Menschen und mit ihnen alle anderen Lebewesen sind Entropieproduzenten (Abb. 2). Menschen und Tiere bauen ihre eigenen Strukturen auf, indem sie andere Strukturen vernichten.

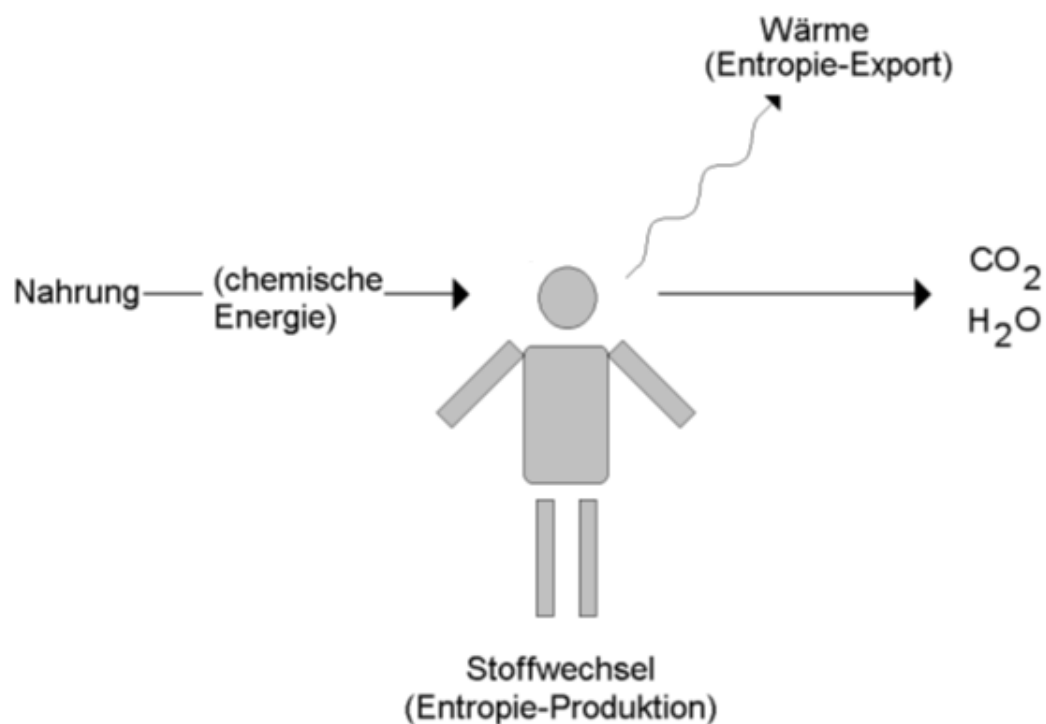


Abb. 2 Lebewesen als Entropie-Produzenten

Die lebende Natur hat sich auch in diesem fundamentalen Prozess – ähnlich wie an vielen anderen Stellen – ein Sparsamkeitsprinzip zu eigen gemacht: Der Abbau biologischer Makromoleküle wie Kohlenhydrate und besonders Nukleinsäuren und Proteine erfolgt häufig nicht bis hin zu kleinen energiearmen Molekülen wie Kohlendioxid, Wasser, Harnstoff oder Ammoniak, sondern nur bis zu einer Größe molekularer Module, die als Bausteine für den Aufbau körpereigener Makromoleküle genutzt werden können. Das bedeutet, dass die aufgenommenen, körperfremden Moleküle gerade soweit zerlegt werden, dass die in ihnen enthaltene körperfremde Information, die in der Abfolge der Bausteintypen codiert ist, zerstört wird. Deshalb werden Proteine zunächst nur zu Oligopeptiden und Aminosäuren, Nukleinsäuren zu Oligonukleotiden und Nukleotiden verdaut, die in neuer organismeneigener Abfolge zu körpereigenen Proteinen bzw. Nukleinsäuren verknüpft werden (Abb. 3). Diese tragen dann in ihrer Struktur die neue organismenspezifische Information. Damit dieser Aufbauprozess ablaufen kann, muss das Lebewesen Energie bereitstellen und im Prozess produzierte Entropie nach außen abgeben.

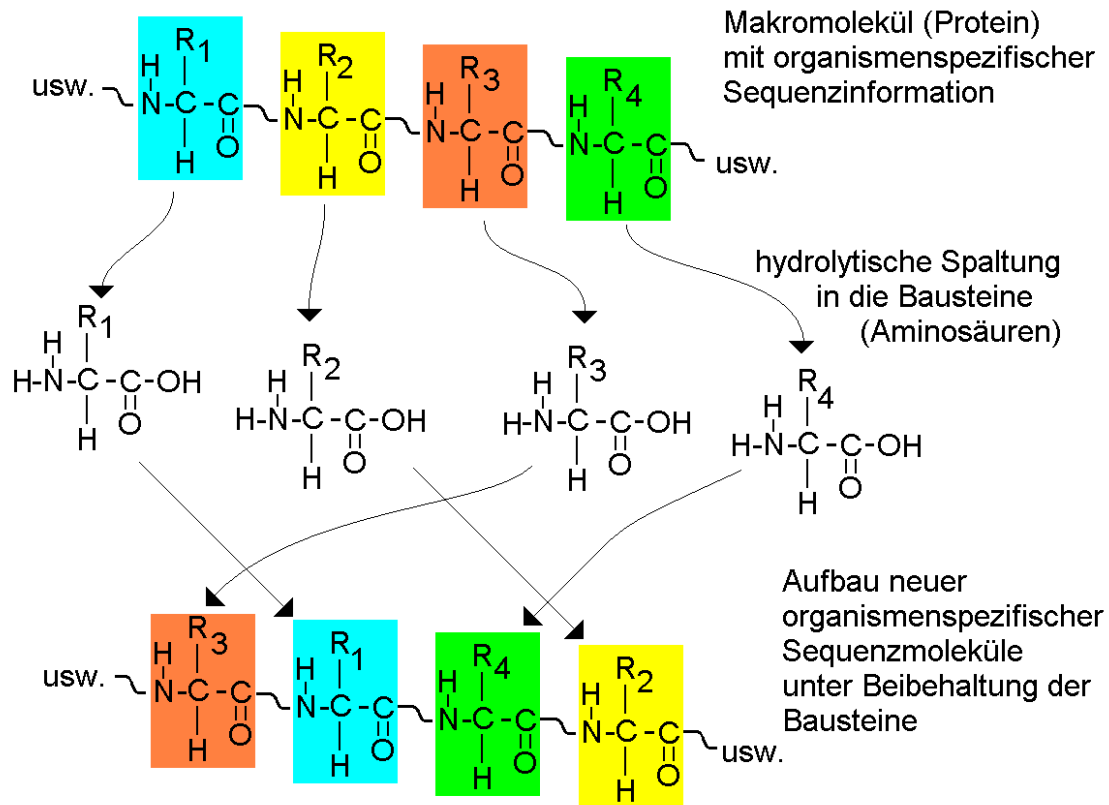


Abb. 3 Optimierung der Entropie-Produktion: Sparsamkeitsprinzip im Stoffwechsel

Auch die technische Erzeugung von Energie ist immer mit einer Produktion von Entropie verbunden. Der Verlust von Ordnung, von Strukturen wird bei der Nutzung von Kohle als Energieträger besonders deutlich: Riesige Kohleflöze – wenn man so will, konzentrierter Kohlenstoff - werden abgebaut, die Kohle wird verbrannt, und das dabei entstehende Kohlendioxid wird in die Atmosphäre entlassen und weltweit verteilt (Abb. 4). Die makroskopische Struktur der Lagerstätte wird auf die atomare Dimension des einzelnen Kohlenstoffatoms heruntergebrochen und dieses als leicht bewegliches, kleines Kohlendioxid-Molekül für ein globales Vagabundieren in der Atmosphäre und den Ozeanen freigegeben.

Tiere, Pilze und zahlreiche Mikroorganismen machen es natürlicherweise ebenso. Sie decken ihren Energiebedarf mittels der Reserven an organischem Material, das Pflanzen, andere Tiere, Pilze oder Mikroorganismen enthalten. Am Ende der Kette chemischer Vorgänge des Stoffwechsels wird ebenso wie bei der technischen Energieerzeugung aus Kohle, Erdöl und Erdgas Kohlendioxid freigesetzt.

Der alltägliche Abbau von Strukturen und die Verteilung von Material erfolgt nicht immer auf atomarer oder molekularer Ebene. Oft werden technische und Alltagsprozesse von der Freisetzung und Verteilung von Partikeln begleitet. Auch dahinter verbergen sich ein Abbau struktureller Ordnung und eine Zunahme von Entropie. Der Kreidestaub, den der Lehrer beim Schreiben an der

Tafel erzeugt, Zigarettenrauch, Kondensate aus den Aerosolen von Deo- und anderen Sprays oder die Rußpartikel in Autoabgasen und Rauch sind nur einige Beispiele.

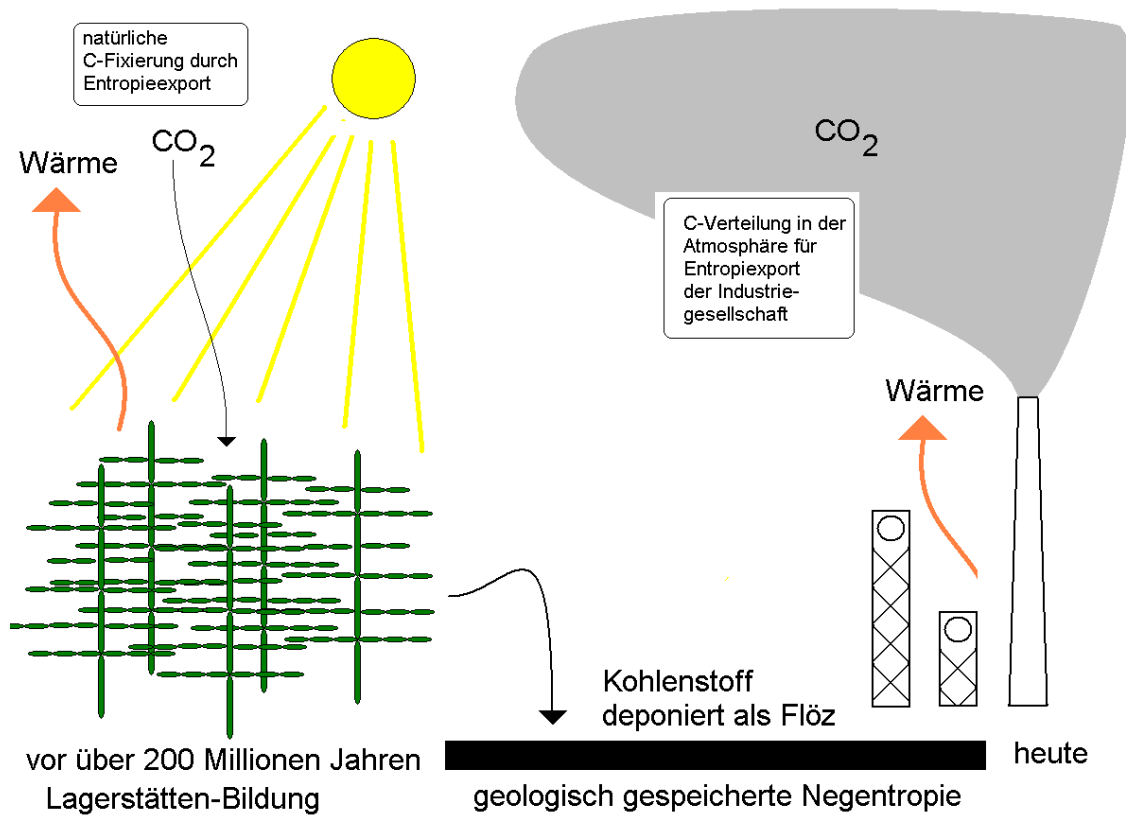


Abb. 4 Entropie-Erzeugung durch energetische Nutzung der Kohle

Partikel werden auch durch natürliche Vorgänge in großem Maßstab generiert und verteilt. Die weiträumige Verteilung von Bestandteilen der Erdkruste als Vulkanstaub rückt bei gefährlichen Vulkanausbrüchen, durch Störung des Flugverkehrs oder im Extremfall durch eine temporäre Absenkung der globalen Jahresmitteltemperatur ins öffentliche Bewusstsein. Schleichender geht die Zerkleinerung und Verlagerung von Gesteinen durch Vorgänge der Erosion, durch Frost- und Windverwitterung und den Abrieb durch Gletscher von statten. Auch alle diese Prozesse bedeuten einen Verlust von Ordnung, eine Produktion von Entropie.

## Triebkräfte

Energieinhalt und Ordnung innerhalb eines Systems bestimmen dessen Potenzial Arbeit zu verrichten. Der Energieinhalt steht dabei für Energieformen, die in Wärme umgewandelt werden können, wie z.B. Lichtenergie, chemische oder elektrische Energie. Aus Wärme lässt sich nur eine Triebkraft zur Verrichtung von Arbeit gewinnen, wenn Temperaturdifferenzen vorliegen, die abgebaut werden können. Allgemein spricht man davon, dass höherwertige Energie in geringer

wertige umgewandelt werden muss. Dabei wird aber der Begriff der Höherwertigkeit gerade aus der Tatsache der Fähigkeit zur Umwandlung in einem spontanen Prozess definiert.

Energiewandlung einerseits und Abbau oder auch Aufbau von Ordnung andererseits können sich gegenseitig kompensieren, d.h. Prozesse können auch spontan ablaufen, solange die Summe beider Komponenten eine entsprechende Triebkraft bereitstellt. Für viele Vorgänge – und namentlich in der Chemie – ist es jedoch sehr zweckmäßig diese beiden Komponenten separat zu erfassen. Die Triebkraft wird als „Freie Energie“  $F$  (Helmholtzsche Wärmefunktion) formuliert:

$$F = U - T * S \quad (1)$$

In dieser Formel bedeuten „ $U$ “ die „Innere Energie“, d.h. die Gesamtheit der Energie, die ein System enthält, „ $T$ “ die absolute Temperatur, die in „Kelvin“ angegeben wird und auf die absolut niedrigste Temperatur (- 273°C) bezogen ist, und „ $S$ “ die Entropie.

Anstelle der inneren Energie  $U$  kann auch mit der Enthalpie  $H$  gearbeitet werden, die den Vorzug hat, bei isobarer Prozessführung gleich der im Prozess getauschten Wärme zu sein. Dann tritt an die Stelle der Freien Energie die Freie Enthalpie  $G$  (Gibbssche Wärmefunktion):

$$G = H - T * S \quad (2)$$

So zweckmäßig diese Formulierungen für die Charakterisierung von Misch- und Transformationsvorgängen sowie chemischen Reaktionen durch Prozess-Energie, Prozess-Enthalpie und Prozess-Entropie ist, so leicht übersieht man in dieser Formulierung den universellen Charakter der Entropie als Maß für die Annäherung an den Gleichgewichtszustand. Dabei kann man durchaus anstelle von  $F$  und  $G$  eine allgemeine Größe für die Triebkraft formulieren, die die Dimension einer Entropie hat und als deren Umkehrung („Neg-Entropie“) verstanden werden kann:

$$S_{\text{neg.}} = -S_{\text{total}} = F/T = U/T - S \quad (3)$$

Diese Größe fasst gewissermaßen die aus den energetischen Verhältnissen und dem Ordnungszustand des Systems herrührenden Komponenten zusammen, die gemeinsam das Potenzial des Systems darstellen.

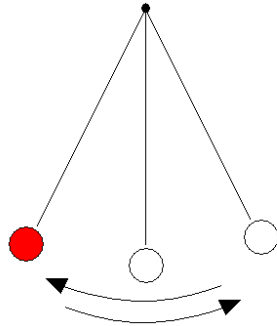
## Wilhelm Ostwald

Wilhelm Ostwald (1853-1932) ist einer der bedeutendsten Väter der physikalischen Chemie. Mehr als die meisten anderen Chemiker seiner Zeit beschäftigten ihn die energetischen Verhältnisse und der zeitliche Ablauf chemischer Reaktionen. Zeitlebens war er bestrebt, die Verbindung zwischen der Messung physikalischer Größen in chemischen Vorgängen und einer allgemeinen Naturerkenntnis herzustellen. Der Zeit als zentraler Größe kam dabei eine besondere Bedeutung in der chemischen Kinetik zu.



Wilhelm Ostwald studierte in Dorpat unter Carl Schmidt (1822-1894), einem Schüler Justus Liebigs. Angeregt durch die physiologisch-chemischen Forschungen Liebigs versuchte er den Gedanken physiologischer Stoffkreisläufe auf mineralische Systeme zu übertragen. Die wissenschaftliche Aufmerksamkeit gegenüber den Wechselbeziehungen zwischen biologischer und anorganischer Welt paarte sich mit dem Interesse für den zeitlichen Ablauf von Veränderungen. Vor allem Schmidts Assistent Johannes Lemberg (1842-1902) widmete seine Forschung kinetischen Studien an Prozessen der anorganischen Chemie, deutete sie mit den damals noch wenig benutzten Begriffen des chemischen Gleichgewichts, des Massenwirkungsgesetzes und der Reaktionsgeschwindigkeit, die vor allem auf sein Vorbild, den Begründer der chemischen Geologie, Bischof (1792-1870) in Bonn zurückgingen. Dieses moderne Denken prägte Wilhelm Ostwald stark. Nach seiner Berufung auf eine Professur für Chemie am Polytechnikum in Riga widmete er sich intensiv dem zeitlichen Ablauf chemischer Reaktionen, studierte katalytische Prozesse und autokatalytische Vorgänge [2]. Mit seinem im damaligen Lehrkörper umstrittenen Ruf nach Leipzig 1887 begann eine außerordentlich fruchtbare Etappe, in der diese Stadt zu einem „Weltzentrum physikalisch-chemischer Forschung“ wurde. Sowohl in der Forschung als auch in der Ausbildung setzte Ostwald Maßstäbe. Seine Arbeiten zur Katalyse wurden 1909 mit dem Nobelpreis gewürdigt. Wilhelm Ostwald war lange Zeit ein energischer Kritiker der atomistischen Vorstellung von der Beschaffenheit der Stoffe. Nach erheblichen Auseinandersetzungen, die 1895 auf der Naturforscherversammlung in Lübeck kulminierten, erkannte er erst 1908 auf Grund der inzwischen vielseitigen, überzeugenden experimentellen Belege den atomaren Aufbau der Materie an. Insbesondere mit Ludwig Boltzmann stritt er auf das Heftigste, wobei er diesem jedoch bei aller wissenschaftlichen Gegnerschaft „höchste persönliche Wertschätzung“ entgegenbrachte und sich deshalb auch bereits 1900 für die Berufung Boltzmanns nach Leipzig einsetzte [3]. Die Offenheit für das Denken anderer trotz mancher gegensätzlicher Grundauffassungen fand auch im Verhältnis Ostwalds zu seinem jüngeren Kollegen Svante Arrhenius ihren Ausdruck, den er vielfältig unterstützte und mit dem ihn eine lebenslange Freundschaft verband, obwohl Arrhenius der atomistischen Theorie viel offener als Ostwald gegenüberstand.

Die Physik der Gleichgewichte beschreibt Vorgänge als symmetrisch in Raum und Zeit.



ideales Pendel:

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = \text{const}$$

reales Pendel:

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} \rightarrow 0 \text{ für } t \rightarrow t_{\infty}$$

Reale Vorgänge erlauben keine Vertauschung des Vorzeichens der Zeitgröße. Sie unterliegen einem Zeitpfeil.

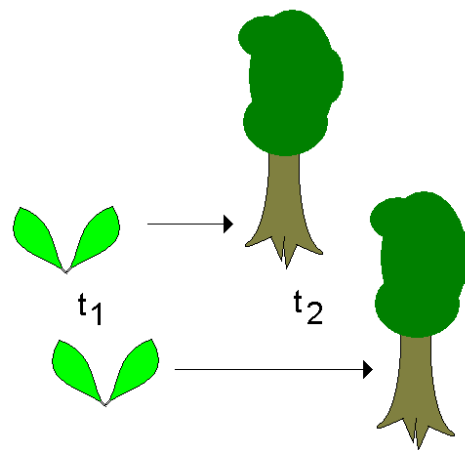


Abb. 5 Irreversibilität in der Natur: das Zeitpfeilargument von Wilhelm Ostwald

Die Beschäftigung mit der chemischen Kinetik und dem Zusammenhang mit thermodynamischen Größen führte Wilhelm Ostwald zu einer fundamentalen Kritik an der mechanistischen Betrachtung chemischer Abläufe und zur Erkenntnis des fundamentalen Unterschieds in der zeitsymmetrischen Beschreibung mechanischer Zusammenhänge und der Unumkehrbarkeit typischer biologischer und chemischer Abläufe (Abb. 5). So schreibt er schließlich: „Die mechanischen Gleichungen haben alle die Eigenschaft, dass sie die Vertauschung des Zeichens der Zeitgröße gestatten, das heißt, die theoretisch vollkommenen mechanischen Vorgänge könnten ebenso gut vorwärts wie rückwärts verlaufen. In einer rein mechanischen Welt gäbe es daher kein Früher oder Später im Sinne unserer Welt; es könnte der Baum wieder zum Reis und zum Samenkorn werden, der Schmetterling sich in die Raupe und der Greis in ein Kind verwandeln. ... Die tatsächliche Nichtumkehrbarkeit der wirklichen Naturerscheinungen beweist also das Vorhandensein von Vorgängen, welche durch mechanische Gleichungen nicht darstellbar sind, ...“ [4].

## Ludwig Boltzmann

Dem energetischen Denken Ostwalds stand das atomistische Materiemodell gegenüber. Ludwig Boltzmann war einer seiner entschiedensten Verfechter [5]. Er war nicht nur ein hochbegabter Naturforscher, sondern verband Zielstrebigkeit, Aufrichtigkeit und harte Arbeit mit einem hohen

Maß an Leidenschaft und Emotion. Der Wechsel zwischen Begeisterung, euphorischem Arbeitseifer und niedergeschlagener Stimmung prägte seinen Alltag und war für ihn eine schwere Bürde. Letztlich steht auch sein tragisches Ende mit diesem komplizierten Gemüt im Zusammenhang. Er selbst führte scherzhafterweise sein Wesen auf den Umstand zurück, „dass er in der Nacht vom Faschingsdienstag zum Aschermittwoch bei den verhallenden Klängen eines Maskenballs geboren worden sei“ [6].

Ludwig Boltzmann wurde am 20. Februar 1844 in Wien in eine bürgerliche Familie geboren [7]. Als hochbegabtes und fleißiges Kind konnte er sich der umfassenden Förderung seiner Eltern und nach dem frühen Tod seines Vaters der Mutter erfreuen. Neben der Gymnasialausbildung, der er sich mit großem Fleiß widmete, lernte er Klavierspielen – u.a. hatte er Klavierstunden bei Anton Bruckner. Nach der Matura begann er 1863 in Wien Mathematik und Physik zu studieren. Schon 1866 wurde er zum Dr. phil. promoviert. Zu diesem Zeitpunkt hatte er bereits zwei wichtige physikalische Arbeiten veröffentlicht und Rigorosa in Mathematik, Physik, Philosophie und österreichischer Geschichte abgelegt. In seiner wissenschaftlichen Arbeit verband Ludwig Boltzmann von Anfang an ein Höchstmaß an Präzision und Zuverlässigkeit mit starkem Urteilsvermögen und gesunder Selbstsicherheit. Schon in seiner ersten Arbeit „Über die Bewegung der Elektrizität in krummen Flächen“ hatte er sich nicht gescheut, eine Vorveröffentlichung zum gleichen Thema zu kritisieren. Seine wichtigsten akademischen Lehrer waren Josef Stefan und Josef Loschmidt. Starken Einfluss auf sein wissenschaftliches Arbeiten hatten auch die Theorien Maxwells.

Nachdem Ludwig Boltzmann bereits 1868 Privatdozent in Wien geworden war, wurde er 1869 als Professor für mathematische Physik nach Graz berufen. Von Graz aus erhielt er unter anderem Gelegenheit zu Studien- und Forschungsaufenthalten in Heidelberg bei Robert Bunsen und Gustav Robert Kirchhoff sowie in Berlin bei Hermann von Helmholtz. In der Zeit danach beschäftigte ihn wieder besonders die Maxwellsche Theorie des Elektromagnetismus und die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen in einem Gas. Das Ergebnis war die Entwicklung der Stoßgleichung und des H-Theorems, mit denen Boltzmann Eckpfeiler der modernen Physik schuf. 1873 wurde Boltzmann als Professor für Physik nach Wien berufen. Bemerkenswerterweise beschäftigte er sich auch dort nicht nur mit Mathematik und theoretischer Physik, sondern arbeitete er auch experimentell, um die allgemeine Gültigkeit der neuen physikalischen Theorien nachzuweisen, wie z.B. seine Untersuchungen zu den Dielektrizitätskonstanten des rhombischen Schwefels zeigen. In diese Zeit fallen Rufe nach Zürich und Freiburg, die Boltzmann jedoch ablehnte. 1876 heiratete Boltzmann. Praktisch gleichzeitig ging er als Professor für Experimentalphysik nach Graz zurück, wo er bis 1890 eine produktive und glückliche Zeit verlebte. Mit seiner jungen Frau und fünf Kindern wechselte er aus der Dienstwohnung in der Stadt in ein kleines Bauerngut bei Graz. Dieses baute er in ein Landhaus um, hat aber nebenher quasi als Hobby-Landwirt gearbeitet, wie die Anekdote deutlich macht, nach der er einmal auf dem Grazer Viehmarkt eine Kuh kaufte, diese eigenhändig am Strick zur Stadt hinaus führte und sich dann von den Zoologen der Universität beraten ließ, wie er die Kuh zu füttern und zu melken hätte.

In den Anfang dieser Grazer Zeit fallen Boltzmanns bahnbrechende Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit und Entropie, die er 1877 in der Arbeit „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht“ [8] veröffentlichte. Als Forscher und akademischer Lehrer hatte Boltzmann in Graz eine starke Ausstrahlung. Unter anderem lernten und arbeiteten Svante Arrhenius und Walter Nernst zeitweise bei ihm, mit denen zusammen er die Freizeit an den Wochenenden auch zu Bergwanderungen nutzte.

Nachdem Ludwig Boltzmann 1888 eine sehr ehrenhafte Berufung auf den Lehrstuhl von Gustav Robert Kirchhoff in Berlin abgelehnt hatte, folgte er 1890 einem Ruf als Ordinarius für Theoretische Physik nach München. In München beschäftigten ihn unter anderem der Elektromagnetismus, die Bestimmung der absoluten Temperatur und die Diffusion bei variablem Diffusionskoeffizient. Besondere geistige Anregung kam aus den Tafelrunden im Hofbräuhaus, in denen Ludwig Boltzmann unter anderen mit Carl von Linde [9], Adolf von Baeyer (1835-1917, Indigosynthese) und den Mathematikern Alfred Pringsheim und Walther Dyck zusammenkam. 1894 wechselte Boltzmann auf den Lehrstuhl für Theoretische Physik in Wien, den zuvor Josef Stefan innegehabt hatte. Diesen Lehrstuhl hatte er bis zu seinem Tod 1906 inne, wobei die Jahre 1900-1902 ein Intermezzo an der Universität Leipzig mit sich brachten. Der Ruf nach Leipzig ging auf Wilhelm Ostwald zurück. Trotz hoher Anerkennung, interessanter wissenschaftlicher Kontakte und erfolgreicher Lehrtätigkeit fühlte sich Boltzmann in Leipzig nicht wohl. Wahrscheinlich spielten gesundheitliche Gründe, vor allem depressive Stimmungen eine große Rolle, als er sich nach zwei Jahren entschloss, wieder nach Wien zurückzukehren. Möglicherweise belasteten ihn bei aller gegenseitigen Wertschätzung auch die Rolle Ostwalds und seiner Energetik in Leipzig, die er als Gegenentwurf zu seiner wissenschaftlichen Weltsicht als „energetische Barbarei“ verstand und energisch bekämpfte.

Boltzmann hatte schon seit seiner Jugend Augenprobleme und litt zunehmend unter einer Sehschwäche. Mit zunehmendem Alter erschwerten Asthmaanfalle, heftige Kopfschmerzen und depressive Verstimmungen zusätzlich die Arbeit und das Alltagsleben. Diese gesundheitlichen Probleme belasteten Ludwig Boltzmann in den Folgejahren in Wien sehr. Im Spätsommer 1905 suchte Boltzmann Linderung durch einen Kuraufenthalt in Duino bei Triest. Als sich dort seine Depressionen verstärkten, entschloss er sich, freiwillig aus dem Leben zu scheiden. Man fand ihn am 5. September 1905 erhängt am Fensterkreuz seines Zimmers im Kurhotel.

## **Die Boltzmann-Konstante**

Die Boltzmannkonstante  $k$  (oder  $k_B$ ) vermittelt zwischen der Wärmeenergie und der kinetischen Energie der Teilchen. Sie ist ein Maß für die Wärmekapazität pro Freiheitsgrad in der Bewegung von

Atomen und Molekülen. Sie entspricht der allgemeinen Gaskonstante R, wenn man diese universelle Konstante mit der Dimension einer Wärmekapazität nicht auf ein Mol Teilchen, sondern auf ein einzelnes Teilchen bezieht. Sie stellt deshalb einen dementsprechend kleinen Wert dar:

$$k_B = 1,38 * 10^{-23} \text{ J/K} = 8,62 \text{ eV/K} \quad (4)$$

Die Boltzmannkonstante findet sich in mehreren zentralen physikalischen Gleichungen, so in der Gleichung für die Entropie und überall dort, wo thermische Energie eine Rolle spielt.

Die Boltzmannkonstante wurde in der aktuellen Form nicht von Ludwig Boltzmann eingeführt, sondern geht auf Max Planck zurück [10]. Die Grundlage für diese Konstante bildete zum einen die Atomtheorie, zum anderen das Wahrscheinlichkeitsprinzip. Beiden stand Max Planck zunächst skeptisch gegenüber. Während für Ludwig Boltzmann der Teilchencharakter der Materie und die sich daraus ergebende molekulare Unordnung selbstverständlich waren und sich der Wahrscheinlichkeitscharakter von molekularen Vorgängen und damit auch der damit verbundenen Prinzipien daraus zwanglos ergab, war Max Planck eher Anhänger eines strengen Determinismus'. Max Planck kannte die Arbeiten Boltzmanns sehr gut. Schließlich nutzte er Boltzmanns Gedankengänge und vor allem das von ihm aus der Thermodynamik hergeleitete Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz in seiner Theorie der Strahlungsprozesse (1900), die zur Grundlage der Quantenphysik wurden.

Auf Grund der zentralen Rolle der Boltzmannkonstante für die Beschreibung thermischer Energien lässt sie sich aus zahlreichen Vorgängen ableiten. Einige Beispiele dafür sind in folgenden Formulierungen von Grundgesetzen gegeben:

Die Zustandsgleichung für ideale Gase (Boyle-Mariotte-Gay-Lussac'sches Gesetz):

$$k_B = p * V / (N * T) \quad (5)$$

(Die Größe p beschreibt den Druck, V das Volumen des Gases, N ist die Teilchenzahl und T die absolute Temperatur.)

Der Gleichverteilungssatz für die Bewegungsenergie von Teilchen:

$$k_B = m * v^2 / (2 * T) \quad (6)$$

(Die Größen m und v stehen für die Masse und die Geschwindigkeit des sich bewegenden Teilchens.)

Die Arrhenius-Gleichung zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Ratekonstanten chemischer Reaktionen:

$$k_B = E_a / [T * \ln(f/k)] \quad (7)$$

( $E_a$  ist die Aktivierungsenergie, d.h. die Höhe der energetischen Barriere,  $f$  die Häufigkeit mit der die zur Reaktion erforderliche Bewegung stattfindet und  $k$  die Häufigkeit, mit der die Reaktion tatsächlich eintritt.)

Die Nernstsche Gleichung zur Beschreibung der Konzentrationsabhängigkeit des elektrochemischen Potentials:

$$k_B = (E - E_0) * z * q_e / [T * \ln(a_{ox}/a_{red})] \quad (8)$$

( $E$  ist dabei das konzentrationsabhängige elektrochemische Potenzial,  $E_0$  das für einen Prozess charakteristische Standardpotenzial,  $z$  die elektrochemische Wertigkeit, d.h. die Zahl der pro Elementarschritt übertragenen Ladungen,  $q_e$  ist die Elementarladung und  $a_{ox}$  und  $a_{red}$  sind die Aktivitäten, d.h. die durch die Aktivitätskoeffizienten korrigierten Konzentrationen, der an der Potenzialbildung beteiligten Spezies in ihrer oxidierten und der reduzierten Form.)

In allen diesen oben genannten Beispielen drückt sich die Statistik der Bewegung der Atome und Moleküle aus. Die Boltzmannkonstante erscheint dabei als eine fundamentale Größe mit der Dimension einer Wärmekapazität oder einer Entropie, so dass sie auch als fundamentale Entropie aufgefasst werden kann. Ihre zentrale Rolle ist eine direkte Konsequenz aus dem diskreten, d.h. atomaren bzw. molekularen Aufbau der Materie. Sie beschreibt die energetischen Verhältnisse in der Impulsübertragung und Bewegung der Bausteine der Materie und damit gewissermaßen dem untersten Niveau, auf dem sich die Impulse und damit auch die kinetische Energie verteilen können. Diese Impulsübertragung in den ungerichteten Bewegungen der Teilchen ist die letzte Stufe der Degradation mechanischer Energie, die wir makroskopisch als Wärme wahrnehmen.

## Prozessgeschwindigkeiten

Die quantitative Beschreibung des Ablaufs chemischer Reaktionen ist Gegenstand der chemischen Kinetik. Dabei werden in der Regel Vorgänge betrachtet, in denen riesige Mengen gleichartiger Teilchen zur Reaktion kommen. Die zeitliche Änderung der Konzentrationen von Ausgangsstoffen und Reaktionsprodukten wird dabei von statistischen Gesetzen bestimmt. Die Reaktionsgeschwindigkeiten sind umso größer, je höher die Konzentrationen der beteiligten Teilchen sind und je größer die Wahrscheinlichkeit ist, dass es bei einer Begegnung von Teilchen zur Reaktion kommt. Am einfachsten ist das am Beispiel eines sogenannten monomolekularen Prozesses nachzuvollziehen. Die Wahrscheinlichkeit des Prozessablaufs selbst ist in diesem Fall nicht von Reaktionspartner abhängig und wird allein durch einen charakteristischen, festen Wert der

Ratekonstanten  $k$ , bestimmt. Deshalb bleibt auch die relative Reaktionsgeschwindigkeit, d.h. die auf die Konzentration der Ausgangsstoffe bezogene Rate konstant. Die absolute Reaktionsgeschwindigkeit vermindert sich jedoch mit der abnehmenden Konzentration der Ausgangsstoffe, wobei die anfänglich hohe Reaktionsgeschwindigkeit zunächst schneller, dann immer langsamer abnimmt. Das wird durch eine Exponentialfunktion beschrieben, die für diese Klasse chemischer Reaktionen wie auch für den Zerfall von radioaktiven Stoffen gilt:

$$c(t) = c(0) * e^{-k * t} \quad (9)$$

Der Ratekonstante entspricht dabei eine charakteristische Prozesszeit:

$$\tau = 1/k \quad (10)$$

Deshalb kann diese einfache kinetische Gleichung auch in folgender Form geschrieben werden:

$$t / \tau = \ln [c_0 / c_t] \quad (11)$$

Diese Gleichung stellt ein wichtiges Beispiel für Prozesse dar, die durch ein statistisches Verhältnis – in diesem Fall der Konzentrationen oder der Reaktionswahrscheinlichkeit – charakterisiert sind, wobei sich dieses Verhältnis direkt als Funktion einer bestimmten Prozessgröße – hier die aktuelle Prozesszeit  $t$  und einer Referenzgröße – in diesem Fall die charakteristische Prozesszeit – darstellen lässt.

In jedem Fall wird ein gerichteter Ablauf beschrieben: Ein System mit einer hohen Konzentration des Ausgangsstoffes geht in einen Zustand über, in dem eine geringere Konzentration dieses Stoffes vorliegt. Der zeitliche Ablauf der Konzentrationsänderung ist durch die zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegende Konzentration eindeutig bestimmt.

## **Svante Arrhenius und die Arrhenius-Gleichung**

Für das Verständnis des Weges zur naturwissenschaftlichen Erkenntnis des fundamentalen Zusammenhangs zwischen der Ordnung, der Energie und der Struktur der Materie lohnt es sich den Blick vom Ende des 19. Jahrhunderts noch kurz um rund ein Jahrhundert zurück zu richten. Um die Wende des 18. zum 19. Jahrhundert hatte die Bestimmung der Massen von Reaktanden und Produkten Wissenschaftler wie Lavoisier, Proust und Dalton zu den grundlegenden Gesetzen der Stöchiometrie und damit zu einer empirisch begründeten Atomhypothese geführt. Massenbestimmungen waren es schließlich auch, die ein reichliches halbes Jahrhundert später Dimitri Mendelejev und Lothar Meyer den Schlüssel für die Formulierung des Periodensystems der chemischen Elemente in die Hand gaben. Damit war jedoch keineswegs jeder Zweifel am atomaren Aufbau der Materie ausgeräumt. Die Naturwissenschaft der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts blieb von der Diskussion für und wider den korpuskulären Charakter der Stoffe bestimmt. Die

breitere Anwendung physikalischer Messmethoden auf die Stoffe und ihre Reaktionen führte gegen Ende des 19. Jahrhunderts zu einem Umschwung der Situation. Mit der Entwicklung der physikalischen Chemie wurden in schneller Folge Erkenntnisse erzielt, die sich sehr gut in das Bild einer aus diskreten Teilchen aufbauenden Materie einfügten. Neben Physikern wie Rudolf Clausius und Ludwig Boltzmann waren es vor allem physikalisch-chemisch arbeitende Wissenschaftler, die zu den raschen Fortschritten im Verständnis der Eigenschaften der Stoffe beitrugen. Unter diesen wiederum war Svante Arrhenius, der am 19. Februar 1859 auf dem Gut Vik nahe Uppsala geboren wurde, ein besonders herausragender und die Wissenschaft bestimmender Kopf [11].

Svante Arrhenius fiel schon als Kind durch seine hohe Begabung auf, studierte in Uppsala schnell und sehr erfolgreich, wobei die gewählte Breite der Fächer, die neben der Mathematik auch Chemie und Mineralogie einschlossen, wichtig für die Ausrichtung seiner wissenschaftlichen Arbeit wurde. Schon zu Beginn seiner Forschungen stand in Stockholm das Phänomen der Dissoziation im Vordergrund, und so konnte er bereits mit 24 Jahren die Grundzüge seiner Dissoziationstheorie niederlegen. Seine Ergebnisse zum Verhalten der Elektrolyte reichte er 1884 zur Promotion an der Universität Uppsala ein, konnte aber damit nur das mäßige Prädikat „non sine laude“ erlangen. Lediglich der Chemiker Otto Pettersson erkannte in Stockholm die überragende Bedeutung der Arbeit. Arrhenius ließ sich jedoch von der ernüchternden Resonanz nicht abschrecken und schickte seine Abhandlung an international führende Wissenschaftler, so an Rudolf Clausius in Bonn, Lothar Meyer in Tübingen, Wilhelm Ostwald in Riga und van't Hoff in Amsterdam. Vor allem Wilhelm Ostwald war fasziniert von der Arbeit, schrieb zurück und reiste noch im August 1884 zum jungen Arrhenius nach Uppsala. Diese Reise war der Beginn einer lebenslangen und wissenschaftlich außerordentlich fruchtbaren Freundschaft [12].

1886 erwiderte Svante Arrhenius Ostwalds Besuch durch einen Arbeitsaufenthalt in Riga. Im Winter 1886/87 experimentierte er dann im Institut von Kohlrausch in Würzburg und lernte dort zufällig zur gleichen Zeit arbeitenden Walther Nernst kennen [13]. Dieser war es, der Svante Arrhenius bewog, mit ihm zum Sommersemester 1887 nach Graz zu gehen. Dort hatte Ludwig Boltzmann den Lehrstuhl für Physik inne und war ein wichtiger Anziehungspunkt für junge Wissenschaftler. Zu dieser Gruppe stieß auch Wilhelm Ostwald und begeisterte den zunächst physikalisch arbeitenden Walther Nernst für physikalisch-chemische Probleme [14]. Die Monate in Graz, die Ausstrahlung Boltzmanns und der lebhaft Austausch zwischen den jüngeren Wissenschaftlern beflügelten die Entwicklung der physikalischen Chemie als neues eigenständiges Wissenschaftsgebiet.

Nachdem Svante Arrhenius den Winter über wieder im heimatlichen Schweden gearbeitet hatte, besuchte er im Frühjahr 1888 zunächst Max Planck in Kiel und anschließend van't Hoff in Amsterdam, mit denen er über die elektrolytische Dissoziation, das Massenwirkungsgesetz und deren Anwendung auf starke und schwache Elektrolyte diskutierte. Im Anschluss daran verbrachte er den Rest des Sommersemesters in Leipzig im Labor Wilhelm Ostwalds, wo unter anderen auch Walther Nernst arbeitete und gerade seine Arbeit zur elektromotorischen Wirkung der Ionen



fertigstellte [15]. Svante Arrhenius beschäftigte sich in dieser Zeit mit dem Zusammenhang zwischen osmotischem Druck und Dampfdruck und setzte seine Arbeiten zur Dissoziation fort. Ein Ergebnis dieser Arbeit war die Abhandlung „Über die Dissoziationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissoziationsgrad der Elektrolyte“ [16]. Der in dieser Arbeit erbrachte Nachweis einer universellen Neutralisationswärme bei der Reaktion einer starken Säure mit einer starken Base war ein Eckpfeiler zur Unterstützung der Theorie der Dissoziation. Die Beschäftigung mit der Temperaturabhängigkeit von chemischen Reaktionen führte Arrhenius auch zur Entdeckung der Rolle der Aktivierungsenergie. Darüber berichtete er ebenfalls noch 1889 in der Veröffentlichung „Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren“ [17]. Mit der Gleichung  $k = \text{const} * e^{(-Q/RT)}$  legte er das Fundament für die Beschreibung der Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen in Abhängigkeit von der Aktivierungsbarriere und der Temperatur [18].

Während Svante Arrhenius bereits als junger Mann im Kreis der internationalen Physikochemiker große Anerkennung gefunden hatte, standen ihm seine Professorenkollegen in Schweden skeptisch gegenüber. Deshalb nahm Arrhenius gern immer wieder Einladungen zur Arbeit im Ausland wie nach Würzburg und Graz an. Vor allem fand er herzliche Aufnahme im Labor seines Unterstützers und Freundes Wilhelm Ostwald in Leipzig. Nach dem Ruf auf eine neugeschaffene außerordentliche Professur in Gießen 1891 bekam Arrhenius endlich in Stockholm eine Dozentur für Physik angeboten, die er sehr gern antrat [19]. Auch wenn er die Reisen während der Vorlesungspausen in andere Länder und Labors und den direkten Kontakt und Austausch mit seinen ausländischen Kollegen sehr schätzte, so blieb er doch zeitlebens und trotz aller Skepsis und Ablehnung, die ihm zu Hause oft entgegenschlugen, seiner schwedischen Heimat verbunden und treu.

## **Universalität physikalisch-chemischer Naturbetrachtung durch Svante Arrhenius**

Ganz unzweifelhaft hat Svante Arrhenius Entscheidendes zur Begründung der physikalischen Chemie als eigenständige Wissenschaft geleistet und durch eine Vielzahl gründlicher experimenteller und theoretischer Untersuchungen sein eigentliches Spezialgebiet entwickelt. Zugleich hat ihn sein weit gespanntes naturwissenschaftliches Interesse aber auch befähigt, sehr wichtige und zum Teil revolutionäre Erkenntnisse in anderen Wissenschaftsgebieten zu erzielen, wobei die moderne Auffassung zu physikalisch-chemischen Problemen stets hilfreich war. Ein schönes Beispiel dafür ist seine Hypothese zur Entwicklung der Kalisalzlagerstätten. Die zur Bildung des Hartsalzes erforderlichen erhöhten Temperaturen deutet er durch eine Folge von Sedimentation, Überlagerung durch jüngere Sedimente von bis zu 2 km Höhe und eine nachfolgende Erosion der Deckschichten. Diese – von der Vorstellung langfristiger, gerichteter Veränderungen in der geologischen Entwicklung getragenen Gedanken – trafen zunächst auf massiven Widerspruch der Experten, dem Arrhenius auf dem Kalitag in Göttingen 1912 jedoch durch eine geschickte Argumentation entgegentrat [20].

Neben physikalischer Chemie, Mineralogie und Kosmologie interessierte sich Arrhenius auch für Meteorologie. Bereits 1888 untersuchte er Phänomene der atmosphärischen Elektrizität und gab als Ursache die kurzwellige Strahlung der Sonne an, die zur Ionisation in der Atmosphäre führt [21]. 1897 berichtete er in Stockholm über seine Vorstellungen über die Ursache des Nordlichts, das er richtig durch den Einfall von Ionen die Erdatmosphäre erklärte, wobei er klar den Zusammenhang zwischen Sonnenfleckenaktivität und Nordlicht sah. Ebenso konnte er durch diesen von der Sonne kommenden Teilchenstrom die Ausbildung von Kometenschweifen erklären [22]. Die Tatsache der Wirkung des Sonnenwindes auf andere Himmelskörper und der Transport von Teilchen durch den Kosmos bestärkten ihn in der Annahme, dass primitive Formen von Leben, z.B. als Sporen, durch den Kosmos transportiert und so verbreitet worden sein könnten [23]. Die durch ihn formulierte Panspermiehypothese stieß vielfach auf Skepsis, bildet aber im Grunde genommen inzwischen die Arbeitshypothese für die heutige Suche nach extraterrestrischem Leben. Ausdruck seines universellen wissenschaftlichen Denkens sind auch die kosmologischen und populärwissenschaftlichen Werke, darunter das „Lehrbuch der kosmischen Physik“ (1903) und das außerordentlich beliebte und vielfach übersetzte Buch „Das Werden der Welten“ (1906) und „Vorstellungen vom Weltgebäude im Wandel der Zeiten“ (1908), daneben eine ganze Reihe astrophysikalisch orientierter wissenschaftlicher und populärwissenschaftlicher Aufsätze [24].

### Problem und Lösung sind seit 100 Jahren bekannt!

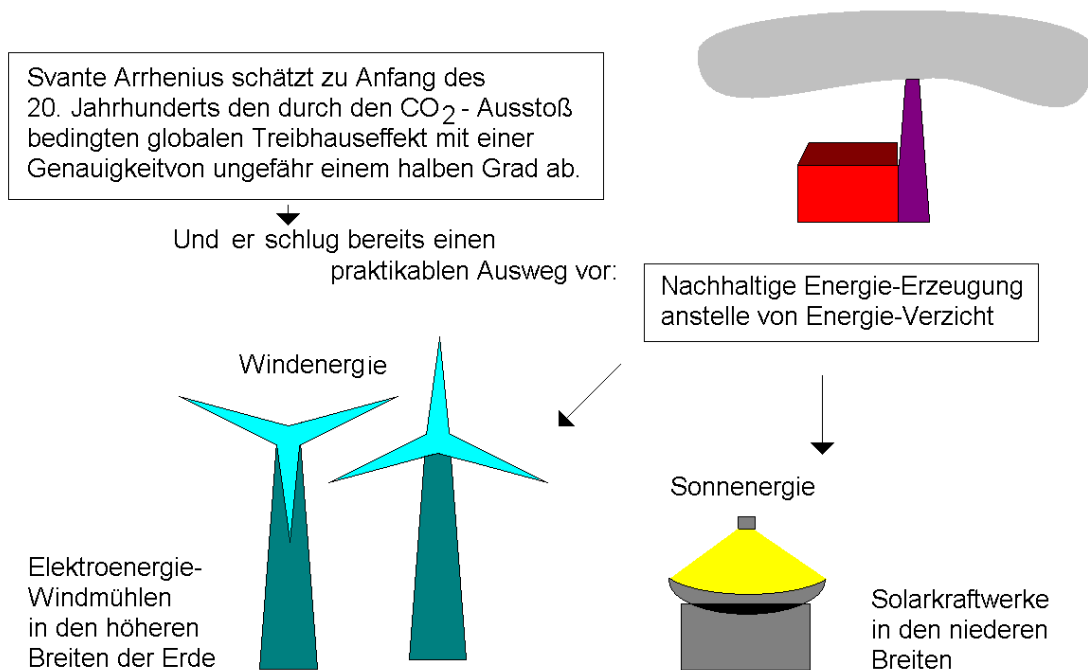


Abb. 6 Weitblick des Physikochemikers Svante Arrhenius (Anfang des 20. Jahrhunderts)

Bereits kurz nach der Jahrhundertwende befasste sich Svante Arrhenius mit dem Problem der Energieversorgung der Erde. Er stellte sich die Frage, wie lange die Menschheit mit dem Erdöl- und

Kohlevorrat reichen würde, von dem die Industriegesellschaft zehrte. Der frühe Zeitpunkt der Beschäftigung mit dieser Frage muss aus heutiger Sicht besonderen Respekt erheischen, wenn man bedenkt, dass Kraftfahrzeuge zu diesem Zeitpunkt erst frisch erfunden waren, neben der Eisenbahn Pferdefuhrwerke das wichtigste Transportmittel waren und es noch keine Luftfahrt gab. In genialer Voraussicht prognostizierte er, dass Solarkraftwerke in den niederen Breiten und Windkraftwerke in den mittleren Breiten die Hauptenergiequellen der Menschheit werden würden [25]. Diese Überlegungen werden durch die derzeit vorstattenehenden Entwicklungen im Rahmen der Energiewende glänzend bestätigt. Ganz besonders hervorzuheben ist, dass sich Arrhenius offensichtlich schon damals vom Gedanken der Nachhaltigkeit in der Energieversorgung leiten ließ, und er die Notwendigkeit der Ankopplung der Energieversorgung der Menschheit an die sogenannten erneuerbaren Energiequellen, d.h. an den Energiefluss von der heißen Sonne über die Erde zum kalten kosmischen Hintergrund erkannte (Abb. 6).

Nicht minder bahnbrechend war Arrhenius' Erkenntnis zur Rolle des atmosphärischen Kohlendioxids für die Klimaentwicklung. 1896 erschien seine Arbeit „Über den Einfluss des atmosphärischen Kohlensäuregehalts auf die Temperatur der Erdoberfläche“ [27]. Er erkannte die Treibhauswirkung des Kohlendioxids aufgrund seiner Infrarotabsorption und deutete die erdgeschichtlich nachweisbaren Verschiebungen der Vegetationsgürtel und Temperaturen während der Eiszeitzyklen im Zusammenhang mit einem Wechsel im CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und schätzte die nötigen Schwankungen zu etwa 50% des aktuellen Gehalts ab. Den Entgegenhaltungen der Fachwelt begegnete er mit einer Neubestimmung der Infrarotabsorption durch CO<sub>2</sub> 1900 in Berlin, ohne dadurch jedoch eine vollständige Anerkennung seiner Theorie zu erreichen [27]. Die modernen Messungen an Eisbohrkernen und Klimamodelle haben die Theorie von Arrhenius inzwischen ebenfalls bestätigt.

## **Informationsmanagement und Wärmelehre**

Auch die Beschaffung und Prozessierung von Informationen benötigt Energie. Diese Binsenweisheit lehrt uns bereits einfach der Stromverbrauch, den Computer haben. Eine mechanische Rechenmaschine bekommt ihre Energie auf mechanischem Wege. In beiden Fällen kann Information akkumuliert oder generiert werden. Energie wird durch das System verbraucht, aber nicht akkumuliert, sondern nur gewandelt. Wie auch die meisten lebenden Systeme lassen sich die mechanische Rechenmaschine und der Computer als ein energetisch ausgeglichenes System verstehen. Das bedeutet, dass der eingehenden mechanischen oder elektrischen Leistung eine exakt gleich große Ausgangsleistung entspricht, die in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben wird (Abb. 7). Aus energetischer Sicht sind die Rechenmaschinen stationär.

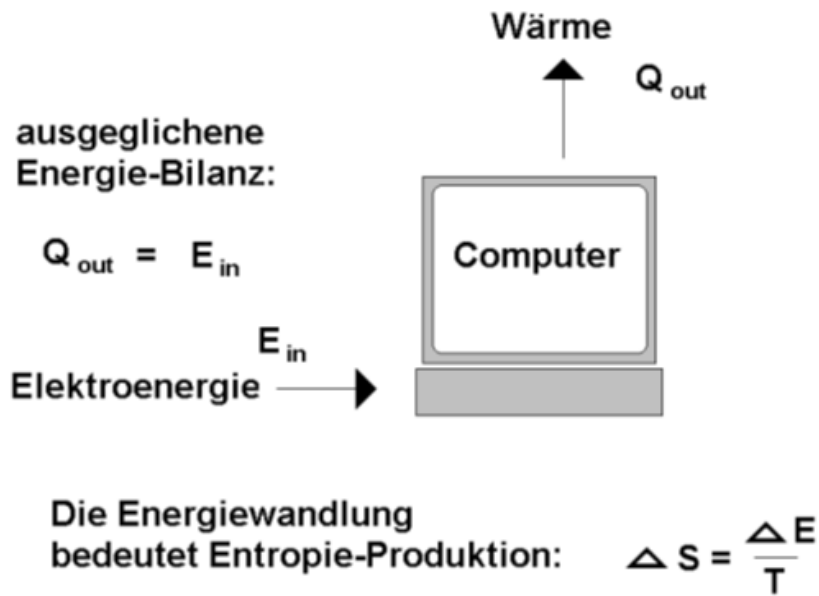


Abb. 7 Computer: ausgeglichene Energiebilanz und Entropie-Produktion

Energiewandlung ist unvermeidlich, wenn Informationen prozessiert werden müssen. Doch wie groß ist die Mindestenergie  $E$  für die Gewinnung einer minimalen Information? Das thermodynamische Limit wird durch die Boltzmann-Gleichung beschrieben. Für den Informationsgehalt von 1 bit ergibt sich:

$$E/E_{th} = [E / (k_B * T)] = \ln(2) \quad (12)$$

Die Größe  $E_{th}$  steht allgemein für die thermische Energie, wenn man diese auf ein einzelnes Teilchen bezieht. Dieser Ausdruck ist gleich dem Verhältnis der molaren thermischen Energie zur Avogadrozahl, d.h. der Teilchenzahl pro Mol.

Für eine beliebige Information im Umfang von  $z$  bit gilt:

$$E/E_{th} = \ln(z) \quad (13)$$

Der Quotient  $E/T$  kann als Entropie verstanden werden, wenn Unsicherheit über das Vorliegen von genau einer von  $z$  Möglichkeiten besteht:

$$E/T = S = k_B * \ln(z) \quad (14)$$

Für diese Entropie gilt die Boltzmannkonstante als Referenzwert, so wie die thermische Energie als Referenzwert für die entsprechende Energie gilt:

$$S/k_B = \ln(z) \quad (15)$$

Bei einer Raumtemperatur von ca. 300 K bedeutet diese Entropie von  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K eine Energie von ca.  $3 \cdot 10^{-21}$  J pro bit. Diese kleine Energiemenge ist von grundlegender Bedeutung für alle Prozesse der Informationsverarbeitung, d.h. auch für die gesamte Computertechnik (siehe dazu unten, Gleichung (24)). In informationstechnischen Prozessen lässt sich die verbrauchte Energie nicht beliebig vermindern. Die Boltzmannkonstante gibt für diese Operationen die untere Grenze an. Ein kleinerer Wert ist nicht möglich. Energieaufnahme – etwa in Form von Elektroenergie – und Energieabgabe als Wärme hängen ursächlich miteinander zusammen. Für den informationstechnischen Prozess sind beide unabdingbar. Der Strom der Energie durch das System – die „Energiedissipation“ – ist unvermeidlich; Energieaufnahme und Wärmeabgabe sind zwei Seiten derselben Medaille.

## Teil II: Entropie und Evolution

### Der Zeitpfeil

Bereits die einfache Beobachtung der uns umgebenden Natur offenbart das fundamentale Zusammenspiel von zwei dynamischen Prinzipien: Zyklisch wiederholte Vorgänge und gerichtete Abläufe. Am deutlichsten tritt diese Kombination in den lebenden Systemen zu Tage, in denen sich die gerichtete Entwicklung von Zellen und Organismen, Populationen und Lebensgemeinschaften, Entstehung, Wachstum, Reifung und Altern mit den Zyklen der Zellteilung und den Zyklen der Fortpflanzung komplexer Organismen durch Generationen paart. Auch wenn wir das Zusammenwirken zyklischer und gerichteter Vorgänge vor allem in den Lebewesen erkennen, so spielt es in den abiotischen Systemen eine ganz analoge Rolle. Vom Umlauf und der Rotation der Erde und anderer Himmelskörper, der Entstehung der Tag/Nacht-Rhythmen und der Jahreszeiten, bis hin zu den Lebenszyklen der Materie von der Geburt über die Entwicklung und das Altern der Sterne, findet sich auch im kosmischen Geschehen die zentrale Rolle zyklischer Vorgänge wieder. Und ebenso wie in den biologischen Systemen werden auch in den kosmischen Vorgängen zyklische Abläufe von gerichteten Prozessen und unumkehrbaren Veränderungen überlagert (Abb. 8). Dazu gehören die kosmische Expansion und die globale Abkühlung des Universums, die „Alterung“, d.h. die Energieverminderung der Photonen auf Grund der Dehnung des Raumes, die Vergrößerung der gigantischen Hohlräume zwischen den galaktischen Superhaufen, die schwindende Dynamik alternder Galaxien, die Bildung schwerer Elemente durch die Nukleosynthese in den Sternen und schließlich auch das Altern der Reststerne und ihr Kollaps zu hochdichter, sogenannter degenerierter Materie in Weißen Zwergen, Neutronensternen und schwarzen Löchern. In all diesen Vorgängen – von den kosmischen Dimensionen bis hin zu den mikroskopischen, biomolekularen Abläufen, in der toten und der lebenden Natur – dominieren langfristig die gerichteten Prozesse, die wie ein unerbittlicher Zeiger den Weg bestimmen, den die Systeme zu nehmen haben. Die zyklischen Vorgänge sind mehr oder weniger stark ausgeprägte Modulationen dieses Zeitpfeils.

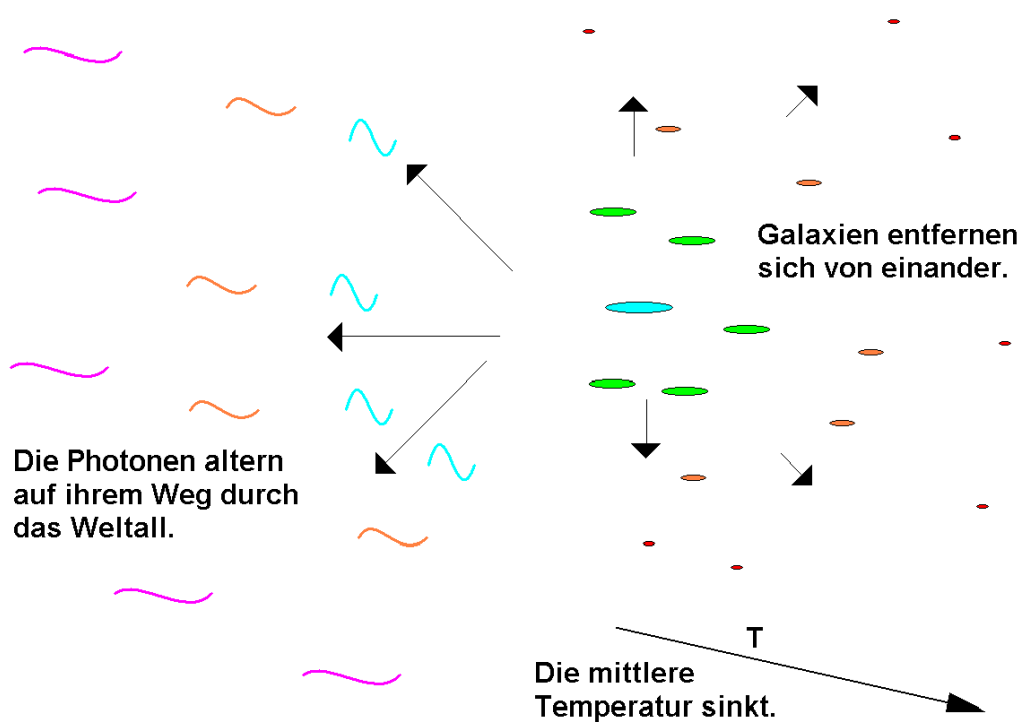


Abb. 8 Der Zeitpfeil im kosmischen Geschehen

Warum hat unsere Welt den Charakter von Einbahnstraßen? Woraus begründet sich der Zeitpfeil?

Am Anfang dieses Abschnitts sollen zwei Gedankenexperimente stehen. Als erstes betrachten wir ein hypothetisches Automobil besonderer Art: Beim Fahren saugt der Motor Kohlendioxid und Wasser aus der Atmosphäre an. Der Motor wandelt diese Stoffe in flüssige Kohlenwasserstoffe um. Die dafür benötigte Energie gewinnt er im Kühler durch Abkühlung der Umgebungsluft. Als Nebenprodukt der chemischen Umwandlung entsteht Sauerstoff, der in die Atmosphäre entlassen wird. Die aus der Abkühlung der Luft entnommene Energie ist größer als die für die chemische Reaktion benötigte. Der Differenzbetrag wird in mechanische Energie umgewandelt, die dem Auto seine Mobilität verleiht. Die entstehenden Kohlenwasserstoffe werden gesammelt und von Zeit zu Zeit an einer Entsorgungsstelle abgepumpt, wofür im Allgemeinen eine nicht unbeträchtliche Gutschrift erfolgt (Abb. 9).

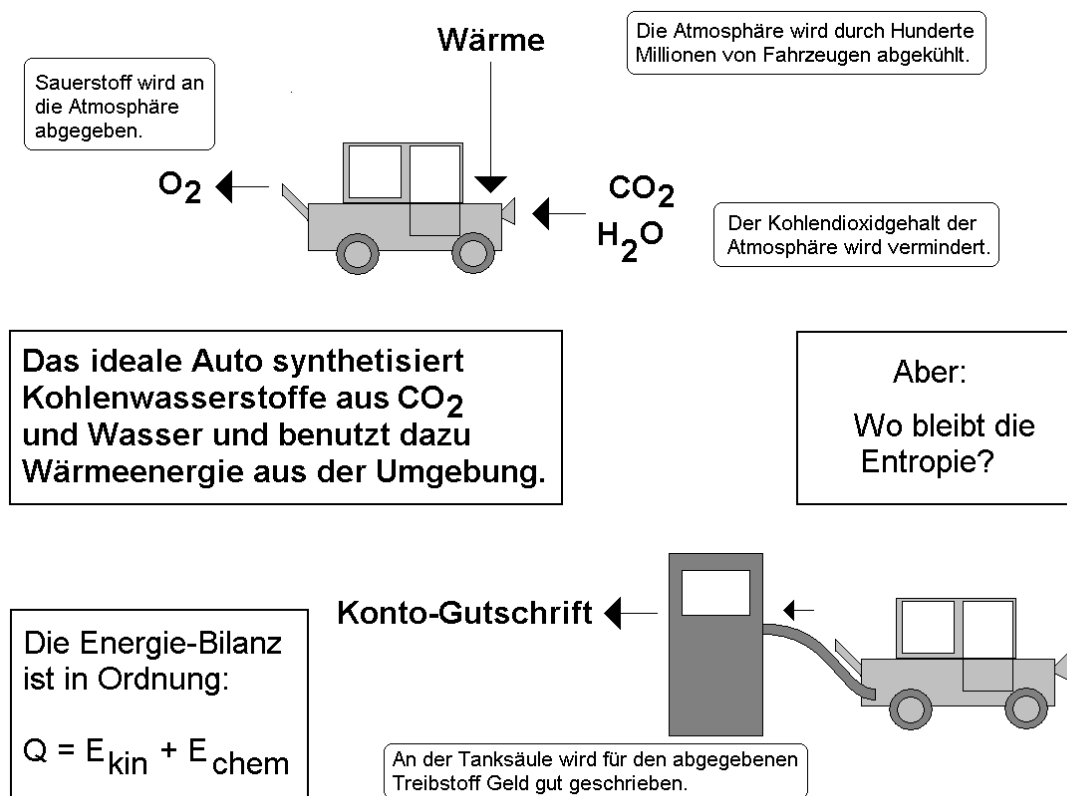


Abb. 9 Das entsprechend dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, aber gegen den Zeitpfeil fahrende Auto

Das Beispiel wirkt auf den ersten Blick absurd. Es widerspricht vollständig der Alltagserfahrung. Dabei ist es aus Sicht des Energieerhaltungssatzes völlig korrekt. Das Fahrzeug stellt kein perpetuum mobile dar. Die Energiebilanz ist in Ordnung. Der Fehler liegt in der Kausalität der Abläufe. Es gibt keine Maschine, die durch spontane Abkühlung der Umgebung mechanische Arbeit verrichten kann. Auch die Erzeugung energiereicher chemischer Verbindungen oder die Erzeugung von Elektroenergie oder Licht lässt sich auf diesem Wege nicht bewerkstelligen. Man spricht bei solchen hypothetischen Maschinen von einem „perpetuum mobile zweiter Art“. Dieses kann es, wie das perpetuum mobile, das den Ersten Hauptsatz der Thermodynamik verletzt, ebenfalls nicht geben. Das perpetuum mobile zweiter Art widerspricht dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Sein Prozessgeschehen würde dem Zeitpfeil zuwiderlaufen.



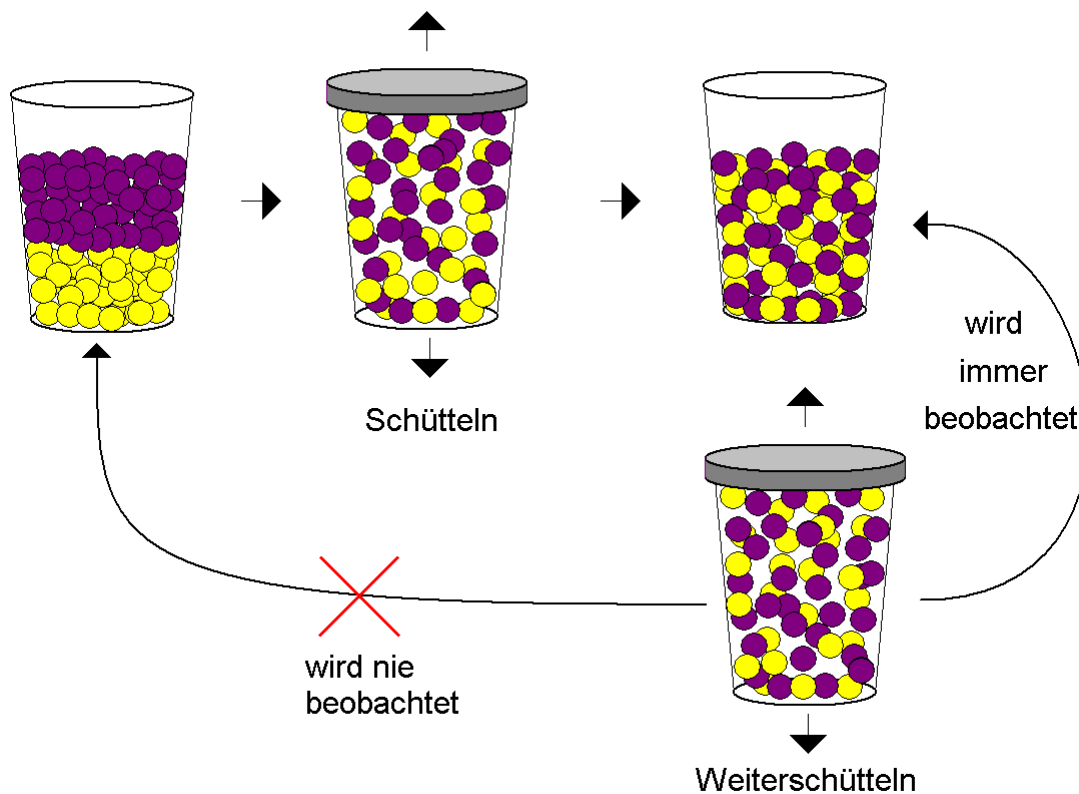


Abb. 10 Das Kugelexperiment: Ordnung und spontane Bewegung

Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik gilt nicht nur für den Wärmeübergang und für chemische Prozesse. Er beherrscht genauso auch mechanische Abläufe und die Prozessierung von Information. Auch diese werden durch den Zeitpfeil bestimmt. Das soll ein zweites Gedankenexperiment verdeutlichen (Abb. 10): In ein Glas werden zunächst hundert weiße Kugeln gefüllt, die etwa ein Drittel des Volumens einnehmen. Anschließend werden darüber hundert rote Kugeln eingefüllt. Diese unterscheiden sich von den weißen nur durch die Farbe. Alle anderen Eigenschaften wie Größe, Dichte, Oberflächenrauigkeit sind völlig gleich. Die Trennung in unten liegende weiße Kugeln und darauf liegende rote Kugeln ist stabil, solange Glas und Kugeln nicht weiterbewegt werden. Schüttelt oder rührt man das Glas, kommt es jedoch zu einer Durchmischung der roten und weißen Kugeln. Das Schütteln oder Rühren besitzt den Charakter einer Aktivierung. Nach kurzer Zeit findet man im unteren und im mittleren Drittel des Glases im Mittel etwa jeweils 50 rote und 50 weiße Kugeln vor. Die anfängliche Ordnung durch die Zweiteilung nach Farben ist damit verlorengegangen. Die genaue Position, die jede der 100 Kugeln zu einem bestimmten Zeitpunkt einnimmt, ist zufällig. Die statistische Mischung in beiden Teilvolumina ist jedoch kein Zufallsprodukt. Man kann das Glas lange weiter schütteln und rühren, ohne dass sich die anfängliche Ordnung wieder einstellen wird. Die Durchmischung der Kugeln ist ein irreversibler Prozess.

Abgeschlossene Systeme gehen, wenn sie sich überhaupt verändern, grundsätzlich von einem weniger wahrscheinlichen – geordneten – in einen wahrscheinlicheren – d.h. weniger geordneten

Zustand über. In einem System, das aus vielen Komponenten besteht, die unterschiedliche Plätze einnehmen können, kann die Wahrscheinlichkeit eines Systemzustands durch die Repräsentation der Mikrozustände beschrieben werden. Die Darstellung der Gesamtaugenanzahl von zwei Würfeln durch unterschiedliche Kombinationen der Augen auf beiden Würfeln ist ein einfaches Beispiel dafür (Abb. 11).

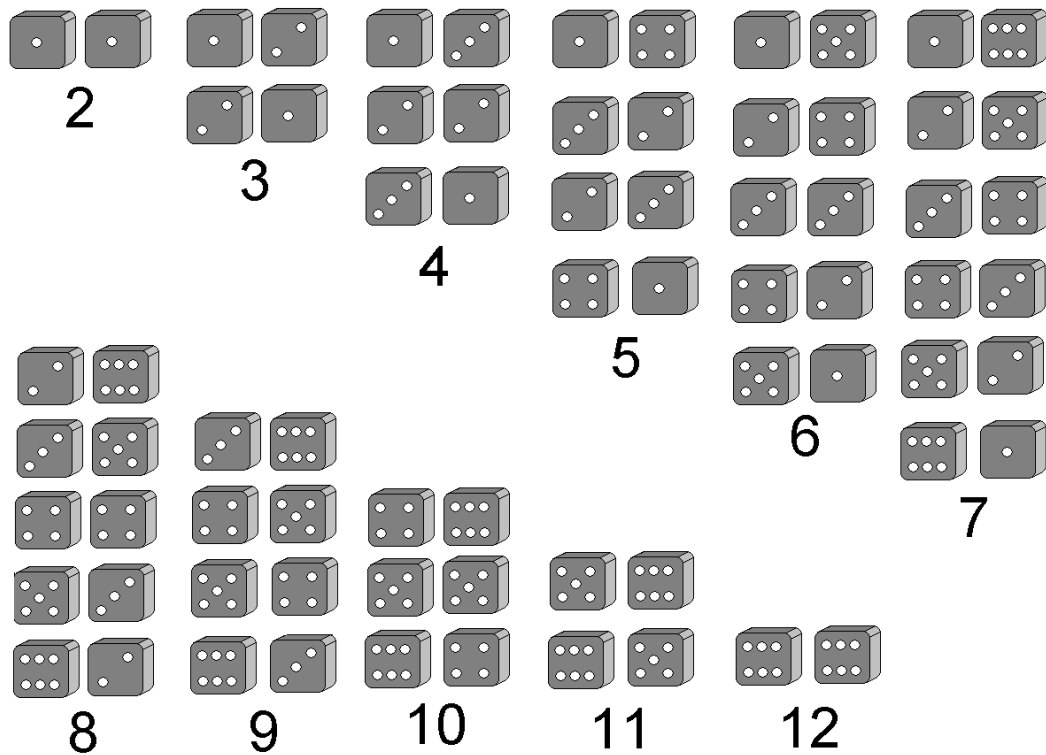


Abb. 11 Repräsentation von Mikrozuständen beim Würfeln mit zwei Würfeln

So gibt es jeweils nur eine Zweierkombination, um die Zahl 2 oder die Zahl 12 darzustellen. Im einen Fall müssen beide Würfeln eine „Eins“, im zweiten beide eine „Sechs“ zeigen. Beide Zahlen werden also nur durch einen einzigen Mikrozustand repräsentiert. Dagegen kann die Zahl „Sieben“ durch sechs Mikrozustände, d.h. mehrere Kombinationen dargestellt werden, nämlich 1-6, 2-5, 3-4, 4-3, 5-2 und 6-1. Deshalb ist es viel wahrscheinlicher, dass man mit zwei Würfeln eine „Sieben“ als eine „Zwölf“ würfelt.

Auch die Richtung der Übertragung von Wärmeenergie ist ein irreversibler Vorgang und entspricht dem Zeitpfeil. Der Wärmeübergang zwischen zwei Körpern mit unterschiedlichen Temperaturen ist in diesem Sinne der Übergang von einem geordneten in einen weniger geordneten Zustand. Der geordnete Zustand ist durch eine räumliche Trennung der thermisch höher angeregten Teilchen von den weniger angeregten Teilchen gekennzeichnet. Nach dem Temperatúrausgleich liegt der weniger geordnete Zustand vor, in dem alle Teilchen im zeitlichen Mittel in gleicher Weise thermisch angeregt sind.

Der Übergang vom geordneten in den weniger geordneten Zustand erfolgt spontan. Er ist stets mit einem Abbau von Freier Energie verbunden. Diese Verminderung der Freien Energie ist die Triebkraft des Prozesses. Deshalb ist er nicht umkehrbar. Dem Vorgang liegt ein Zeitpfeil zu Grunde.

Abgesehen von der Dynamik im Mikrokosmos, etwa der Impulsübertragung zwischen den Teilchen eines Gases oder im chemischen Gleichgewicht, sind praktisch alle Vorgänge irreversibel. Makroskopische Prozesse, an denen Körper beteiligt sind, die aus mehreren Molekülen und Atomen aufgebaut sind, laufen immer unter einem Verlust an Freier Energie ab. Das hat seine Ursache einfach darin, dass stets systemische Ordnung und/oder systemische Energie von der makroskopischen Ebene auf die mikroskopische Ebene übertragen wird. Am einfachsten wird das im Falle der mechanischen Bewegung deutlich: Makroskopische Bewegungen wie das Fahren eines Autos oder eines Schiffes erfordern die Überwindung der Reibungskraft, des Luft- oder Wasserwiderstandes. In allen Fällen wird mechanische Energie in Reibungswärme umgewandelt. Diese Umwandlung stellt nichts anderes dar, als die Übertragung eines Teils des makroskopischen Impulses auf die Bewegung der Teilchen, die sich als Erhöhung des Wärmeinhalts und damit als messbare Temperaturerhöhung bemerkbar macht. Quantitativ kann die dabei übertragene Energie als Entropiezunahme beschrieben werden.

Bei der Übertragung von Energie von der makroskopischen auf die mikroskopische Ebene stellt die Ebene der Atome und Moleküle offensichtlich eine fundamentale Grenze dar. Nach Einstellung des thermischen Gleichgewichts kann die Entropie nicht weiter zunehmen. Bildlich gesprochen gibt es keine kleineren Teilchen, die in Unordnung versetzt werden könnten als Atome und Moleküle. Tatsächlich gilt dieses Bild nur, solange sich die Teilchen selbst nicht verändern. Chemische Strukturen innerhalb der Moleküle können neben der Übertragung von mechanischen Impulsen eine weitere Quelle Freier Energie sein und ihr Abbau würde zu einem weiteren irreversiblen Geschehen führen.

Die Zunahme der Entropie auf der Ebene der Atome und Moleküle durch einen Temperatenausgleich zwischen zwei Körpern wird durch deren Wärmekapazität bestimmt. Die Entropie selber hat die Dimension einer Wärmekapazität, wobei sie definitionsgemäß durch das Verhältnis von getauschter Wärme und absoluter Temperatur bestimmt wird. Für die mikroskopischen Vorgänge lässt sich für jede Temperatur eine charakteristische Energie angeben, die den Charakter, der auf ein Teilchen bzw. einen Bewegungsfreiheitsgrad bezogene Elementarenergie hat. Das Verhältnis dieser Energie zur absoluten Temperatur stellt eine elementare Entropie dar. Diese Größe ist die Boltzmannkonstante  $k_B$ .

Die statistische Formulierung der Entropie (siehe oben) kann ganz einfach so umgeschrieben werden, dass die Ordnung eines Systems als Verhältnis seiner Entropie zu dieser Referenzgröße dargestellt wird:

$$S/k_B = \ln(w_0) \tag{16}$$

Die Größe  $w_0$  bezeichnet dabei die Zahl der Mikrozustände, die das System repräsentieren. Sind wie beim Würfelspiel oder beim Lösen mehrere Züge möglich, so geht deren Anzahl  $w$  in die Gleichung ein:

$$S/k_B = \ln(w_0/w) \quad (17)$$

Mit einer zunehmenden Anzahl von Zügen  $w$  wird das System besser bestimmt, was gleichbedeutend mit einer sinkenden Entropie ist. Dieses Prinzip gilt natürlich nicht nur für Atome und Moleküle, sondern für alle Systeme, die aus Komponenten bestehen, die geordnet oder ungeordnet sein können. Auch im Makroskopischen muss Aufwand getrieben werden, um Ordnung herzustellen. So lässt sich die Boltzmann-Gleichung schreiben, indem  $S$  durch eine allgemein für einen bestimmten Aufwand stehende Größe  $Y$  und  $k_B$  durch ein Referenzmaß für den Aufwand  $Y_0$  ersetzt wird. Auf der rechten Seite der Gleichung steht dann die zu beschreibende statistische Wahrscheinlichkeit, ein Mengenverhältnis, ein Verhältnis von aufgewendeter Zeit zu Referenzzeit, oder das entsprechende Frequenzverhältnis:

$$Y/Y_0 = \ln(w_0/w) \quad (18)$$

Bereits oben war zu sehen, dass sich auch andere zentrale Gleichungen der physikalischen Chemie in dieser allgemeinen Form darstellen lassen. Ein einfaches Beispiel ist das Zeitgesetz für einen Prozess erster Ordnung. Das Verhältnis des Zeitbedarfs  $t$  für das Erreichen einer bestimmten Konzentration  $c$  und der charakteristischen Reaktionszeit ( $\tau = 1/k$ ) wird durch die Ausgangs- und die Zielkonzentration bestimmt:

$$t/\tau = \ln(c_0/c) \quad (19)$$

Noch deutlicher wird die Analogie im Falle der Arrhenius-Gleichung (20). Die zu überwindende Aktivierungsbarriere  $E_a$  stellt einen zu erbringenden Aufwand dar. Die thermische Energie  $E_{th}$  ( $= k_B \cdot T$ ) ist die entsprechende Referenzgröße. Die Zahl der Möglichkeiten, die prinzipiell zur Reaktion führen können, wird durch den Frequenzfaktor  $f$  ausgedrückt, die Frequenz der tatsächlich reaktionswirksamen Ereignisse durch die Ratekonstante  $k$ :

$$E_a / E_{th} = \ln ( f / k ) \quad (20)$$

Die durch diese Gleichung beschriebenen Vorgänge sind irreversibel, d.h. durch den Zeitpfeil behaftet. Für Vorgänge auf der mikroskopischen Ebene stellt die Boltzmannkonstante als elementare Entropie die Referenzgröße dar.

Ganz allgemein lassen sich mikroskopische Vorgänge, die durch eine große Zahl von Teilchen statistisch gut beschrieben werden können, durch eine Gleichung dieser Form erfassen. Der zahlenmäßige Anteil von aktionsfähigen Teilchen wird dabei gut durch den Boltzmannfaktor bestimmt, in dessen Exponent das Verhältnis von Aktivierungsbarriere und thermischer Energie stehen. Das gilt auch für die elektrochemische Potenzialbildung, wobei im Falle von

Redoxelektroden das Aktivitätsverhältnis von elektrochemisch wirksamer oxidierender und reduzierender Spezies die Rolle der Wahrscheinlichkeit übernimmt. Der Logarithmus dieses Verhältnisses ist gleich dem Verhältnis der charakteristischen elektrochemischen Energie  $\Delta E_{el}$  zur thermischen Energie:

$$\Delta E_{el} / E_{th} = \ln (a_{ox}/a_{red}) \quad (21)$$

$$\text{mit } \Delta E_{el} = (E - E_0) * z * F \text{ und } E_{th} = R * T$$

wobei E und  $E_0$  für das konzentrationsabhängige Elektrodenpotential und das Standardpotential stehen. Die Gleichung ist nichts anderes als eine alternative Schreibweise für die Nernstschen Gleichung für die Potenzialbildung unter Gleichgewichtsbedingungen an Redoxelektroden:

$$E - E_0 = [R * T / (z * F)] * \ln (a_{ox}/a_{red}) \quad (22)$$

Die analoge Formulierung gibt es natürlich auch für das Gleichgewicht bei thermischen Reaktionen. Hier steht die Freie Standardreaktionsenthalpie  $\Delta G^0$  anstelle der elektrochemischen Energie, und hinter dem Logarithmus steht die Gleichgewichtskonstante K als Verhältnis der Ratekonstanten von Hin- und Rückreaktion  $k_1$  und  $k_2$ :

$$\Delta G^0 / RT = \ln(k_2/k_1) \text{ oder: } \Delta G^0 = - R * T * \ln(K) \quad (23)$$

Grundsätzlich gilt diese Gleichung aber auch für makroskopische Systeme. Der einzige Unterschied besteht darin, dass andere Referenzgrößen berücksichtigt werden müssen. Ein typisches Beispiel dafür ist der Energieaufwand für den Betrieb von Computern.

Die theoretische Grenze für den Energieaufwand bei einer Computeroperation  $E_{min}$  von 1 bit ist durch die Boltzmann-Gleichung und die Operationstemperatur gegeben:

$$E_{min} = k_B * T * \ln(2) \quad (24)$$

Das sind bei Raumtemperatur etwa  $3 * 10^{-21}$  J (siehe oben). Diese Energie ist etwa gleich der elektrischen Energie, mit der ein einzelnes Elektron in einem Potential von 0,1 V beschleunigt wird. Die real für den Schaltprozess im Computer benötigte Energie ist jedoch viel höher und lässt sich anhand der aufgenommenen Leistung berechnen. Nehmen wir der Einfachheit halber die summarische aufgenommene elektrische Leistung als Aufwand  $y$  an, so lässt sich mit Hilfe der Arbeitsfrequenz für die Elementaroperation der Referenzaufwand  $E_0$  berechnen:

$$E_0 = E / \ln(2) \quad (25)$$

Für eine angenommene Leistung pro Prozessorkern von 30 W und einer bit-bezogenen Taktrate von 3 GHz ergibt sich:

$$E_0 = 30 \text{ W} / (3 * 10^9 \text{ s}^{-1} * \ln(2)) = 1,4 * 10^{-8} \text{ J} \quad (26)$$

Dieser Wert ist der Referenzwert für die energetische Effizienz des Computers. Er kann als Systemkonstante betrachtet werden, mit deren Hilfe sich der Aufwand für jede bestimmte Berechnungsaufgabe auf diesem Computer ermitteln lässt. Der große Faktor zwischen dem theoretischen Minimalwert und diesem realen Wert ist der Tatsache geschuldet, dass bei jeder elektronischen Elementaroperation im Prozessorchip nicht nur ein einzelnes Elektron bei minimaler Spannung transportiert wird, sondern – trotz aller Miniaturisierung – immer noch beträchtliche Ladungspakete verschoben werden müssen.

Eine unerfreuliche Folge dieses Missverhältnisses ist der große Bedarf an elektrischer Gesamtleistung, die weltweit durch Computer und andere elektronische Systeme in Wärme umgewandelt wird. Diese liegt in der Größenordnung von einem Terrawatt, was mehreren hundert Kraftwerken entspricht. Deshalb ist nicht nur aus technischen und wirtschaftlichen Gründen, sondern vor allem auch aus ökologischer Sicht die Entwicklung neuer Prozessorprinzipien mit geringer Leistungsaufnahme dringend geboten.

Da die eingesetzte Energie letztlich in Wärme umgewandelt wird, ist im Falle der Computer wie auch bei allen anderen elektrischen Geräten, der Zuwachs an „systemischer Unordnung“ direkt als Entropie messbar. Alle Maßnahmen des Stromsparens, alle Verbesserungen in der Effizienz elektrischer Geräte zielen auf die Verminderung dieser Entropieproduktion. So stellt aus Sicht der direkten Entropieproduktion die Substitution von Glühwendellampen, bei denen über 95% der elektrischen Energie sofort in Wärme umgewandelt wird und nur weniger als 5 Prozent als Licht genutzt werden können, durch Halbleiterlumineszenzdioden, die bei gleicher Lichtleistung nur einen Bruchteil der Stromaufnahme haben, einen großen Fortschritt dar.

Diese Wertung lässt aber außer Betracht, dass die Herstellung und der Einsatz dieser optoelektronischen Leuchtmittel Aufwand an anderen Stellen verlangt, so z.B. bei der Gewinnung der Rohstoffe, bei deren Aufbereitung und im vergleichsweise sehr anspruchsvollen und auch energieaufwändigen Prozess der Halbleiterfertigung sowie für die Entsorgung nach Ablauf der Nutzungsdauer. Ökobilanzierungen machen deutlich, dass diese Faktoren neben dem Stromverbrauch berücksichtigt werden müssen. Typischerweise gehen der Energieverbrauch in der Herstellung und Entsorgung sowie die pro Lichtleistung freigesetzte Menge an Treibhausgasen in solche Bilanzen ein.

Daneben ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch schwer berechenbare, indirekt wirksame Größen wie der Bau von Gebäuden und Transportanlagen, Verpackung und Distribution einbezogen werden müssen. Der benötigte Aufwand schlägt sich nicht nur im Energieverbrauch und in molekular oder atomar dispergierten Nebenprodukten nieder, die mit dem klassischen Entropiebegriff gut quantitativ erfasst werden können. Ihm steht eine Nutzung und Verteilung von Materialien gegenüber, für die der Zeitpfeil ebenso wirksam ist, für die aber andere Referenzgrößen als die Boltzmannkonstante herangezogen werden müssen.

## Dissipative Strukturen

Strukturen lassen sich auf praktisch allen Größenskalen finden. Viele können wir direkt mit unseren eigenen Sinnen erkennen, andere mittels Instrumenten wahrnehmen. Trotz der ungeheuren Vielfalt, in der uns Strukturen in Natur und Technik gegenüber treten, lassen sich im Hinblick auf den Zeitpfeil zwei große Gruppen prinzipiell unterscheiden (Abb. 12). Die Struktur eines Kristallgitters, die Häuser einer Stadt und die Jahresringe eines Baumes gehören in die eine Kategorie, die Flammen eines Feuers und die Wellen auf dem Meer gehören zu der anderen.

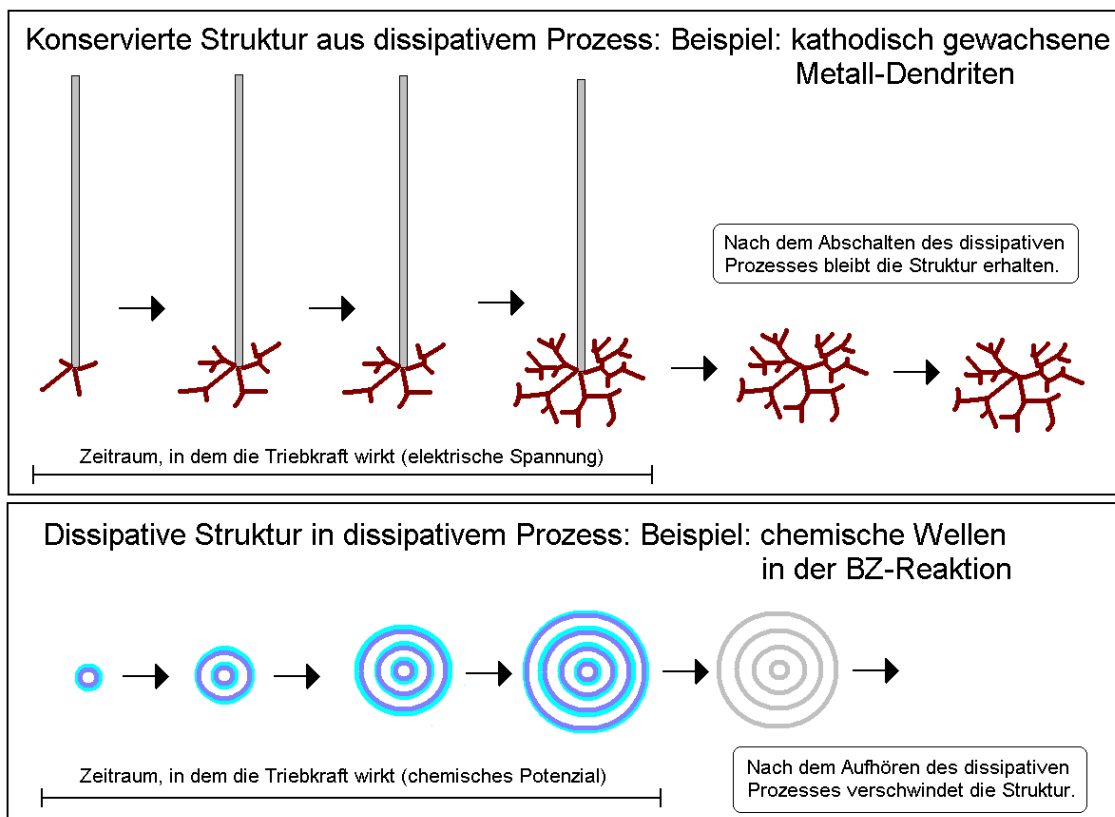


Abb. 12 Konservierte und dissipative Strukturen

Was unterscheidet die Jahresringe prinzipiell von den Meereswellen? In den Jahresringen bildet sich die Periodizität des Jahreslaufes ab. Ihre Entstehung ist die Folge eines periodischen Prozesses, der sich in dem im Holz festgeschriebenen Wechsel von dichterem und weniger dichtem Material niederschlägt. Diese Struktur entsteht im Ergebnis eines physiologischen Vorganges, bei dem Ordnung dadurch entsteht, dass ein Baum Lichtenergie aufnimmt, Wärmestrahlung abgibt und damit Entropie in seine Umgebung exportiert. Die entstehende Struktur der Jahresringe stellt eine konservierte Struktur dar. Sie braucht zwar den Energie dissipierenden Prozess für ihre Entstehung, aber die Jahresringe bleiben auch nach dem Ende des Wachstums- und Entropieexport-Prozesses erhalten. So können die Jahresringe z.B. in Gestalt des Furniers eines alten Möbelstücks noch nach

vielen Jahrhunderten sichtbar sein. Durch sekundäre, konservierende Prozesse, wie eine Mineralisierung, bleiben die Baumringe als Struktur in Gestalt von Baumstammfossilien unter Umständen sogar über Jahrhundertmillionen erhalten.

Eine ganz andere Situation liegt bei den Wasserwellen vor. Weht der Wind kräftig, so bauen sich große Wellen auf, lässt er jedoch nach, so verringern sich die Wellenhöhen bald, und bei völliger Flaute beruhigt sich das Meer und ist bald spiegelglatt. Die Wasserwellen sind wie die Baumringe die Begleiterscheinung eines Energie-dissipierenden Prozesses. Im Unterschied zu den Baumringen verschwinden sie jedoch, sobald ihr Antrieb erlischt. Sie werden nicht konserviert. Ihre Existenz ist an den permanenten Antrieb, die permanente Dissipation von Energie gebunden. Strukturen, die diese direkte Abhängigkeit von einem Energie-dissipierenden Vorgang haben, nennt man deshalb „dissipative Strukturen“.

Dissipative Strukturen stellen eine Form von vergänglicher Ordnung dar. Sie entstehen, wenn sich ein System in hinreichender Entfernung vom thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Mit Annäherung an das Gleichgewicht brechen dissipative Strukturen zusammen. Der fortwährende Durchsatz von Energie, die Produktion von Entropie und der permanente Export von Entropie bilden aus thermodynamischem Blickwinkel die typischen Merkmale eines dissipativen Systems.

Neben Wellen und Flammen, Wasserwirbeln und Feuerwerk sind auch lebende Systeme als dissipative Strukturen zu begreifen. Zwar stellt ein lebender Körper in seinem physischen Aufbau ein konserviertes System dar, die Lebensprozesse selber sind aber ein ganz typischer dissipativer Prozess, der mit der Ausbildung dissipativer Strukturen einhergeht. Konzentrationsverteilungen von Gasen und Nährstoffen in Zellen, Geweben und Organen auf der einen Seite und Nervenerregungen, Schallsignale auf der anderen Seite stellen typische dissipative Strukturen dar.

Häufig bilden sich dissipative Strukturen als charakteristische – oft periodische – Muster ab. Die konzentrischen oder spiralförmigen Strukturen von chemischen Wellen, wie sie z.B. bei der Belousov-Zhabotinsky-Reaktion auftreten, sind Beispiele solcher chemischen, dissipativen Strukturen. Anstelle propagierender Wellen können auch stationäre dissipative Strukturen, sogenannte Turing-Muster gebildet werden. Ganz analog stellen Muster in der Anordnung und Bewegung von Organismen in Schwärmen solche dissipativen Strukturen dar – z.B. bei Fisch- oder Vogelschwärmen, aber auch in der Anordnung von beweglichen Mikroorganismen.

In jeder Struktur, so auch in den dissipativen, steckt eine Strukturinformation. Insofern stellt eine dissipative Struktur ein geordnetes System dar. Obwohl durch den Energie-dissipierenden Prozess fortlaufend Entropie produziert wird, repräsentiert das dissipative System einen Zustand reduzierter Entropie. Der Schlüssel zum thermodynamischen Verständnis liegt auch hier im Begriff des Entropie-Exports. Der Ordnungszustand kann nur dann auftreten, wenn die entstehende Entropie nach außen abtransportiert wird. Dissipative Systeme müssen thermodynamisch offen sein, müssen einen Entropie-Export gewährleisten.



Morphogenese in der Welt der Lebewesen ist immer an die Dissipation von Energie gebunden. Lebende Systeme sind dissipative Systeme. Viele Komponenten der Strukturbildung in Organismen sind als dissipative Strukturen aufzufassen. Die Aufrechterhaltung von Lebensfunktionen setzt einen Stoffwechsel und damit die Dissipation von Energie voraus. Damit die systemische Ordnung erhalten bleibt und neue Ordnungen aufgebaut werden können, müssen Lebewesen zwangsläufig Entropie in die Umgebung abgeben. Leben ist immer an Entropieexport gebunden. Die Unterbrechung der Nahrungs- oder Gaszufuhr führt bei jedem Lebewesen über kurz oder lang zu einer Unterbrechung der Energiedissipation und damit zum Tod.

Technische Prozesse und Systeme befinden sich in einer völlig analogen Situation. Auch technische Strukturen können nur aufgebaut werden, wenn Energie dissipiert wird. Technische Systeme können nur laufen, wenn Entropie produziert und exportiert wird. Laufende technische Systeme sind deshalb ebenso wie Organismen dissipative Systeme. Im Allgemeinen brechen ihre Strukturen jedoch nicht mit dem Abschalten der Energiequelle zusammen. Die Funktionsstrukturen technischer Systeme haben in der Regel den Charakter konservierter Strukturen. Der Nutzer technischer Systeme erwartet, dass er diese nach Belieben abschalten und zu einem späteren Zeitpunkt wieder in Betrieb setzen kann. Das ist nur möglich, wenn das System auch im abgeschalteten Zustand mit allen wesentlichen Funktionskomponenten erhalten bleibt. Technische Systeme sind in diesem Sinn konservierte Strukturen mit einem an- und abschaltbaren Entropie-Export-Verhalten.

Höhere Lebewesen lassen sich demgegenüber nicht an- und abschalten. Bestenfalls kann die Intensität ihres Entropieexports reduziert werden, z.B. im Winterschlaf. Im Gegensatz dazu gibt es in Form von Mikroorganismen, Sporen oder Samen Lebensformen, die sich wie ruhende technische Systeme quasi in einem abgeschalteten Zustand befinden können, etwa bei tiefen Temperaturen oder Trockenheit.

## **Autopoesis und Gaia-Hypothese**

Leben kann von sehr intensiven Stoffwechselprozessen begleitet sein, Leben kann aber auch unter stark verlangsamten Bedingungen für die physiologischen Abläufe existieren. Ein Beispiel für eine Reduktion der Aktivität ist der Winterschlaf bei Säugetieren. Eine stärkere Verminderung der Aktivität liegt bei wechselwarmen Lebewesen und tiefen Temperaturen vor. Manche Mikroorganismen können extrem lange Zeiten des Zellzyklus besitzen. Daneben gibt es aber offensichtlich – vor allem bei einfachen Einzellern wie Bakterien - auch Formen, bei denen die Stoffwechselprozesse komplett ruhen. Das ist mit hoher Wahrscheinlichkeit bei Bakterien der Fall, die über Jahrzehnttausende und zum Teil über Jahrhundertmillionen in Gesteinen eingeschlossen waren, aber dennoch aus ihrer Ruheform heraus wieder kultiviert werden konnten wie im Falle des salzliebenden Bakteriums *Halococcus dombrowskii*.

Sowohl abgeschaltete Maschinen als auch komplett ruhende Formen des Lebens wie Dauersporen haben keinen Energiedurchsatz. Sie exportieren keine Entropie. Ihre Strukturen sind nicht dissipativ, sondern komplett eingefroren, d.h. konserviert.

Worin besteht aber der wesentliche Unterschied zwischen abgeschalteten technischen Systemen und Ruheformen des Lebens wie Samen oder Sporen? Im Falle von mechanischen Maschinen bleibt deren Struktur zwischen An- und Abschalten im Wesentlichen erhalten. Ruhezustand und Entropie-Export-Zustand gleichen sich im Hinblick auf den Aufbau des Systems. Der Übergang zwischen beiden Zuständen ändert – abgesehen vom Energiedurchsatz und der Arbeit, die das System leistet und der dafür erforderlichen Bewegung – das System nicht. Im Gegensatz dazu geht der Übergang zwischen dem Ruhezustand und dem aktiven Zustand der lebenden Systeme mit einer Änderung der Struktur und wesentlichen Eigenschaften des Systems selbst einher. Typische Erscheinungsbilder dafür sind Stoffwechsel und Morphogenese. Aus der Ruheform – z.B. Sporen oder Samen - und mit Hilfe der in ihr gespeicherten Information heraus entwickelt sich ein neues, häufig sehr komplex aufgebautes und funktionierendes System. Diese Fähigkeit zur „Gestaltung aus sich selbst heraus“ wird als Autopoese (Autopoesis) bezeichnet. Autopoetische Systeme vereinigen in sich demzufolge die stofflichen und die Informations-Voraussetzungen für den Übergang von einem konservierten, ruhenden Zustand – also einem Zustand ohne jeglichen Entropieexport – in einen Gestalt- und Funktions-bildenden dynamischen – d.h. dissipativen - Zustand, soweit die äußeren Bedingungen diesen Übergang zulassen.

Das Prinzip der Autopoesis aus einem Ruhezustand heraus findet man bei Bakterien ebenso wie bei den Sporen von Pilzen und den Samen von Pflanzen. Mithin handelt es sich um ein in der Biosphäre sehr weit verbreitetes Prinzip, das keineswegs nur auf primitive Lebensformen wie Prokaryonten beschränkt ist. Letztlich kann die Entwicklung jedes Organismus', kann jede Morphogenese als eine Form von Autopoesis verstanden werden.

Autopoesis bleibt auch nicht auf einzelne Organismen beschränkt. Die Entwicklung von Formen und Funktionen aus einfachen Anfangs- oder Ruhezuständen findet sich auch bei der Entwicklung von Populationen und Lebensgemeinschaften. Ein typisches Beispiel dafür ist die Entstehung komplexer Lebensgemeinschaften bei der Neubesiedlung von Arealen nach katastrophalen Ereignissen oder nach drastischen Umweltveränderungen. Die Autopoesis drückt sich bei diesen Vorgängen in der Entwicklung von einfachen Pioniergesellschaften hin zu komplexen Reifestadien der Lebensgemeinschaften (Klimax) aus.

Auch das Leben auf der Erde als Ganzes, d.h. die Evolution der Biosphäre, kann als ein langer autopoetischer Vorgang aufgefasst werden. Der Zeitpfeil, die Irreversibilität, die der Evolution des Lebens auf der Erde innewohnt, wird von einer allmählichen Gestaltung der globalen Lebensgemeinschaften begleitet. Nach globalen Katastrophen, wie sie mehrfach am Übergang zwischen geologischen Formationen aufgetreten sind, lief dieser autopoetische Prozess unter neuen, veränderten Bedingungen ab und führte zu völlig neuen Formen von Lebewesen und

Lebensgemeinschaften. Diese globalen autopoetischen Vorgänge haben dabei nicht nur die Welt der Lebewesen hervorgebracht, sondern zugleich auch deren globalen Lebensraum verändert und in vielfacher Hinsicht den Bedürfnissen der Lebenswelt angepasst. Der Zustand der oberen Erdkruste und der Ozeane, die Gaszusammensetzung der Atmosphäre und die Oberflächentemperatur der Erde sind maßgeblich Produkt dieser langfristigen autopoetischen Gestaltungsvorgänge. Die Analogie zwischen diesen Vorgängen und der autopoetischen Morphogenese einzelner Organismen hat zu der Idee geführt, die Erde als globalen Superorganismus zu begreifen. Diese Vorstellung wird als „Gaia-Hypothese“ bezeichnet.

Wie die individuelle Morphogenese verlangt jeder autopoetischer Vorgang nach einem äußeren Antrieb, nach Energiedurchsatz, Entropieproduktion und Entropieexport. Autopoesis setzt also stets ein Zusammenspiel von inneren Voraussetzungen – der Autopoesis-Fähigkeit eines Systems – und äußeren Bedingungen – Energie-, Entropie- und Stoffaustausch – voraus. Das gilt auch für die Erde und ihr Ökosystem als Ganzes.

## **Die Erde als getriebenes System**

Das von der Sonne kommende Licht spielt für die Erde, für die Dynamik auf ihrer Oberfläche und vor allem für das Leben eine ganz zentrale Rolle. Mechanistisch betrachtet stellt Licht einen Reaktionspartner in der Photosynthese dar. Aber seine Wirkung auf die stoffliche Welt ist doch ganz anders als die von chemischen Reaktionspartnern. Und sie ist auch ganz anders als die Wirkung von Wärme. Licht lässt sich nicht allein durch seinen Charakter als Energie beschreiben. Genauso wenig darf es allein als Teilchen aufgefasst werden. Stattdessen gibt es seine Natur in der Gleichzeitigkeit von Teilchen- und Wellenfeldcharakter zu erkennen.

Das von der Sonne kommende Licht stellt eine extrem breitbandige elektromagnetische Strahlung dar. Von dieser über ein weites Spektralgebiet verteilten Strahlung nehmen wir mit unseren Augen nur einen sehr kleinen Ausschnitt wahr. Dieser liegt jedoch im Bereich der höchsten Strahlungsintensität. Außerdem zeichnet sich dieser sichtbare Spektralbereich dadurch aus, dass er der langwelligste ist, in dem in signifikantem Umfang bereits resonante Wechselwirkungen mit den Elektronensystemen von Atomen und Molekülen auftreten. Diesen unterschiedlichen Resonanzen haben wir die Farben zu verdanken, die wir in der Natur sehen und die wir inzwischen durch gezielte Synthesen technischen Produkten geben können.

Die resonante Wechselwirkung zwischen Licht und Stoffen stellt jedoch auch in thermodynamischer Hinsicht eine wichtige Besonderheit dar. Resonanz bei der Absorption von Licht durch Stoffe bedeutet, dass die Energie eines Lichtteilchens, eines Photons, exakt der Differenz zwischen einem Energieniveau entspricht, das von einem Elektron eingenommen wird und einem höheren Energieniveau, in das das Elektron übergehen kann. Bei einem entsprechenden resonanten Absorptionsprozess wird die gesamte Energie eines Photons in die elektronische Anregungsenergie

eines Teilchens im Stoff übertragen (Abb. 13). Die Energie eines Photons liegt weit über den Energien der thermischen Anregung bei Raumtemperatur. Sie ist durch seine Wellenlänge bzw. die Frequenz bestimmt, wobei als Koeffizient das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  auftritt:

$$E_{ph} = h \cdot \nu = h \cdot c/\lambda \quad (27)$$

Ein Photon blaugrünen Lichtes mit einer Wellenlänge von  $0,5 \mu\text{m}$  besitzt demnach eine Energie von etwa  $4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Das ist etwa um zwei Größenordnungen über der thermischen Energie ( $k_B T$ ) bei Raumtemperatur. In einer Umgebung von Raumtemperatur, mit der das Teilchen über mechanische Stöße gekoppelt ist, stellt eine solche Aktivierung eine extreme Auslenkung dar.

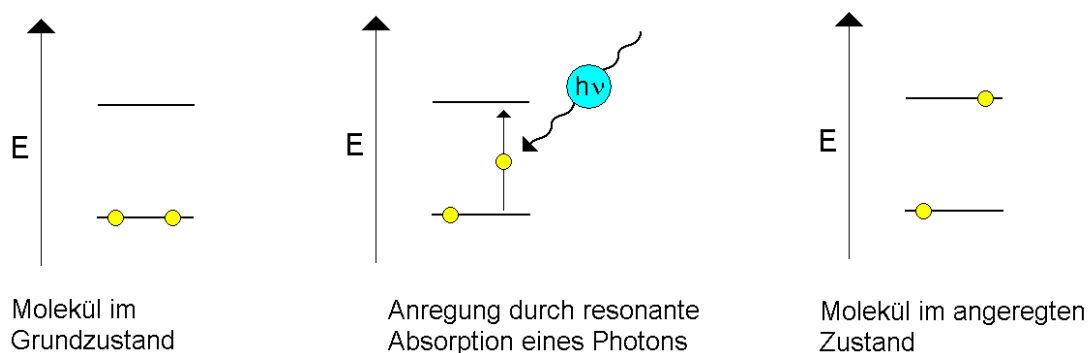


Abb. 13 Resonante Absorption eines Photons durch den Übergang eines Elektrons innerhalb eines Moleküls von einem niedrigeren in einen höheren energetischen Zustand

Der angeregte Zustand muss im Hinblick auf die nicht elektronisch aktivierte Umgebung als extrem unwahrscheinlich angesehen werden. Diese Sonderstellung lässt sich als Wahrscheinlichkeit  $P_{exc}$  ausdrücken, wenn man den energetischen Aufwand, d.h. die Aktivierung durch das Photon  $E_{exc}$  in Relation zur thermischen Energie (Referenzaufwand) setzt:

$$E_{exc} / E_{th} = \ln(1/P_{exc}) \rightarrow P_{exc} = e^{-E_{exc}/E_{th}} \quad (28)$$

Diese Sonderstellung lässt sich auch als Potential zum Export von Entropie über thermische Dissipation erklären. Die über das Photon eingekoppelte Entropieexportreserve  $S_{exc-res}$  kann durch die Differenz der beiden Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden:

$$S_{exc-res} = S_{out} - S_{in} = \ln(1/P_{exc}) \quad (29)$$

Bei dem durch das Photon angeregten Teilchen handelt es sich also – sofern die Anregung zumindest in der weiteren Umgebung der Raumtemperatur erfolgt – um einen extrem gleichgewichtsfernen Zustand. Aus dieser Tatsache leitet sich die Möglichkeit zur Bildung energiereicher Verbindungen ab, wie es bei der Photosynthese aber auch bei vielen anderen photochemischen Reaktionen tatsächlich der Fall ist. Alternativ kann die Anregungsenergie aber auch zur chemischen Zerstörung

des Farbstoffs führen, was Photobleichung genannt wird. Oder sie kann einfach als thermische Energie abgegeben werden, was der typische Weg bei allen Farbstoffen ist, die nicht photochemisch umgesetzt werden, und was „strahlungslose Desaktivierung“ genannt wird.

Die Fähigkeit der lebenden Natur zur Nutzung des aus dem Licht gewonnenen Entropieexport-Potenzials ist die zentrale thermodynamische Komponente der Entwicklung der Biosphäre und damit auch der biologisch bestimmten Erdatmosphäre überhaupt. Ihr verdanken wir und alle Lebewesen den heutigen global gesehen sehr lebensfreundlichen Zustand unseres Planeten.

Sonnenlicht wird zu großen Teilen von der Erdoberfläche und vom Meer absorbiert. Das ist prinzipiell unabhängig davon, ob Lebewesen vorhanden sind oder nicht. Die Ankopplung des Stoffwechselgeschehens der lebenden Natur an das Sonnenlicht macht jedoch das thermodynamische Potenzial dieser Strahlung für die Erde nutzbar. Für die Entropiebilanz gelten global die analogen Bedingungen wie bei der auf eine einzelne Zelle oder ein einzelnes Molekül bezogenen Betrachtung.

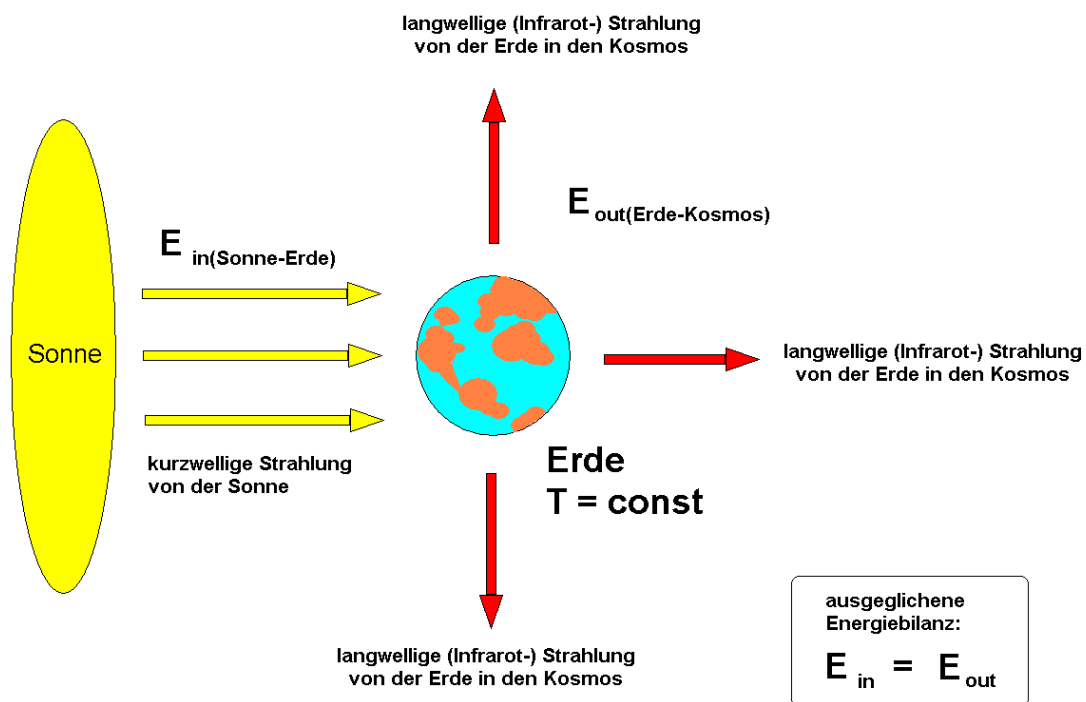


Abb. 14 Energiebilanz der Erde

Zunächst soll dazu die Energiebilanz der Erde untersucht werden (Abb. 14): Die Erde ist ein thermodynamisch offenes System, denn sie steht im Energieaustausch mit dem Weltall. Dabei ist die eingehende Strahlung von der Sonne nur die Hälfte der Realität. Würde die Erde ausschließlich Strahlung von der Sonne empfangen, aber keine Energie in den Weltraum abgeben, hätte sich die Erde längst auf die Oberflächentemperatur der Sonne aufgeheizt. Es gebe kein flüssiges Wasser und

keine feste Erdkruste. Stattdessen wäre die Erde ein feuriger Ball aus heißem Plasma. Tatsächlich gibt es jedoch neben der sichtbaren und unsichtbaren Strahlung von der Sonne noch einen zweiten Strahlungsprozess. Dieser Prozess betrifft die gesamte Erdoberfläche und den gesamten Himmel. Er ist jedoch mit unseren Augen nicht wahrnehmbar, weil er im Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums liegt. Er sorgt für den Abtransport überschüssiger Wärme in den Weltraum. Das Funktionieren dieses Prozesses verdanken wir der Tatsache, dass der Weltraumhintergrund – vom sehr geringen Beitrag ferner Gaswolken und Sterne abgesehen – praktisch keine kurzwellige Strahlung zur Erde sendet, sondern lediglich mit der kosmischen Hintergrundstrahlung strahlt, einer Mikrowellenstrahlung von knapp 1 cm Wellenlänge. Diese entspricht einer Gleichgewichtstemperatur von 2,7 K, d.h. einem Wert unter dem Kondensationspunkt von Helium. Deshalb ist der kosmische Hintergrund sehr kalt, und die Raumfahrer nehmen ihn außerhalb der Erdatmosphäre als tiefschwarz wahr. In diesen Hintergrund strahlt die Erde Energie ab. Die Energie der Photonen dieser Erdstrahlung korrespondiert mit der Oberflächentemperatur der Erde von ca. 300 K, und die Wellenlänge der Strahlung liegt im mittleren Infrarotbereich.

Es ist kein Zufall, dass die Erde als globales System über Jahrzehnte und Jahrhunderte hinweg eine ungefähr konstante Oberflächentemperatur hat, obwohl wir doch ständig von der Sonne bestrahlt werden. Tatsächlich stellt die Oberflächentemperatur der Erde das Ergebnis eines sich selbst regelnden Prozesses dar (Abb. 15). Die Intensität der in den Weltraum abgegebenen Strahlung, d.h. die emittierte Gesamtleistung der Erde ist umso höher, je höher die Oberflächentemperatur ist. Deshalb reagiert die Erde auf einen stärkeren Energieeintrag mit einer Temperaturerhöhung. Die Temperatur steigt so lange an, bis die emittierte Leistung wieder der aufgenommenen Leistung entspricht. Das System regelt sich dadurch auf einem neuen Niveau ein. Bei einer Verminderung des Leistungseintrags spielt sich die Regelung in umgekehrter Richtung ab. Die zunächst noch höhere Temperatur der Erdoberfläche sorgt durch eine Abstrahlung, die den Energieeintrag übertrifft, für eine Abkühlung. Durch die Abkühlung vermindert sich die Strahlungsleistung der Erde, bis die abgestrahlte Leistung wieder gerade der eingestrahnten Leistung entspricht und sich bei erniedrigter Temperatur wieder eine ausgeglichene Energiebilanz einstellt. Eine bestimmte mittlere Oberflächentemperatur der Erde ist damit ein Indikator für eine bestimmte Energiebilanz.

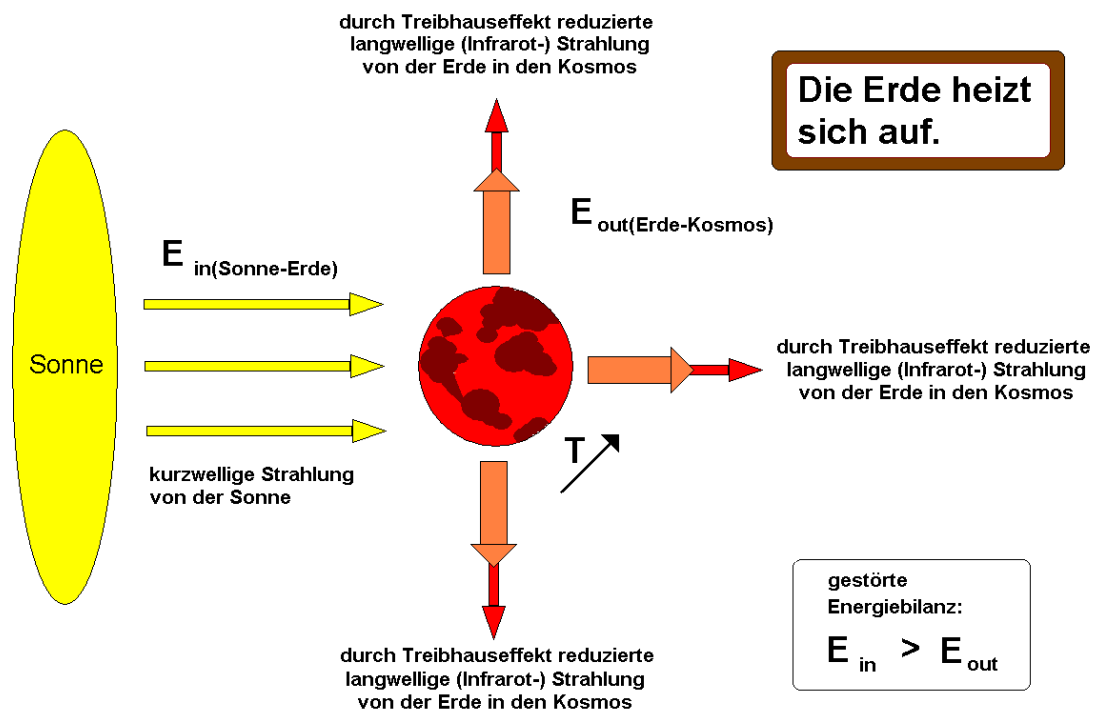


Abb. 15 Die Erde als sich selbst thermisch regelndes System: Erhöhung der Oberflächentemperatur bei reduzierter Infrarot-Transparenz der Atmosphäre

Während bei gleichbleibender mittlerer Oberflächentemperatur die Energiebilanz der Erde – vereinfacht und global betrachtet – ausgeglichen ist, stellt die Erde einen großen Entropieproduzenten dar (Abb. 16). Wäre die Erde ein abgeschlossenes System, müsste diese Entropieproduktion zu einem fortwährenden Verlust an Ordnung und Strukturen führen. Das ist jedoch nicht der Fall. Tatsächlich ist die Erde eine gigantische Entropie-Export-Maschine [28].

Die globale Produktion und der Export von Entropie werden durch die Energiewandlung auf der Erde bestimmt. Maßgeblich dafür ist die Wandlung der von der Erde absorbierten kürzerwelligen Strahlung, die von der Sonne kommt, in die relativ langwellige Strahlung, die die Erde an den kosmischen Hintergrund abgibt. Für einen definierten Zeitraum – z.B. ein Jahr – kann man diese Größen direkt als Energien und Entropien angeben.

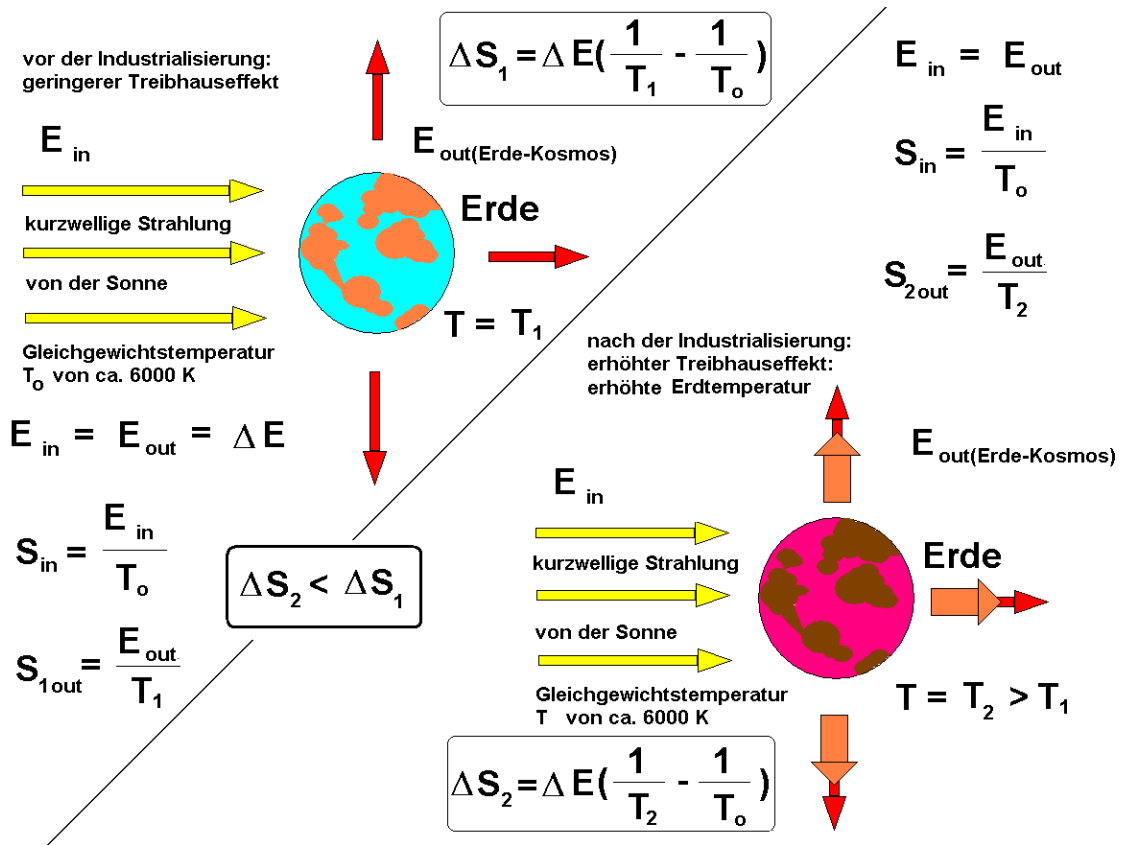


Abb. 16 Die Erde mit ihrer durch den erhöhten Treibhauseffekt veränderten Entropie-Bilanz

$$S_{\text{ex-res, erde}} = S_{\text{out, erde}} - S_{\text{in, erde}} = E_{\text{in, erde}}/T_{\text{erde}} - E_{\text{out, sonne}}/T_{\text{sonne}} \quad (30)$$

Für  $E_{\text{in, erde}} = E_{\text{out, erde}} = E_{\text{erde}}$  (ausgeglichene Energiebilanz) befindet sich die Erde im stationären Zustand. Es gilt für das durch den globalen Strahlungshaushalt zur Verfügung gestellte Entropieexportpotential:

$$S_{\text{ex-res, erde}} = E_{\text{erde}} * (1/T_{\text{erde}} - 1/T_{\text{sonne}}) \quad (31)$$

Für eine gleichbleibende Strahlungsleistung der Sonne und eine konstante spektrale Charakteristik der Sonnenstrahlung ist dieses Entropieexport-Potential umso größer, je niedriger die Temperatur der Erde ist. Wird die Wärmeabgabe an das Weltall behindert, wie das z.B. partiell durch die erhöhte Reabsorption von Wärmestrahlung aufgrund eines erhöhten Anteils von Treibhausgasen in der Atmosphäre der Fall ist, so steigt die mittlere Temperatur der Erdoberfläche und damit vermindert sich das Entropieexportpotential (Abb. 25). Eine wärmere Erde neigt also stärker zu Struktur- und Informationsverlust.

Der durch die Verstärkung des Treibhauseffektes eintretende Verlust an Entropieexport-Potenzial folgt direkt aus Gleichung (31):

$$\Delta S_{\text{ex-res, erde}} = E_{\text{erde}} * (1/T_{1, \text{erde}} - 1/T_{2, \text{erde}}) \quad (32)$$



Eine Temperaturschwankung von 10 Grad hat bei der mittleren Oberflächentemperatur der Erde von rund 300 K demzufolge bereits einen Verlust an Entropieexport-Potenzial von rund 3% zur Folge.

## **Entropie, Information und Evolution**

Der Aufbau und die Entwicklung von Organismen ist nur möglich, in dem in diesen Systemen systemrelevante („systemische“) Eigenschaften als Information gespeichert werden. Im Laufe einer Individualentwicklung akkumuliert ein Organismus systemische Information. Letztlich sind auch die Erfahrungen, die ein Organismus im Laufe seines Lebens sammelt und die sein Behaupten in der Umwelt fördern, solche akkumulierten Informationen. Diese Akkumulation von Information ist nur möglich, weil der Organismus einen Metabolismus hat, der ihn befähigt, Entropie, die er zwangsläufig produzieren muss, in seine Umgebung zu exportieren. Diese „Negentropie“ stellt aber nur einen sehr kleinen Betrag dar, wenn man sie mit der durch den Stoffwechsel produzierten Entropie vergleicht.

Die Bewertung dieser systemischen Information hängt vom Blickwinkel ab. Während der Aufbau einer Struktur – zumal solcher feingliedrigen Strukturen wie sie durch die Moleküle, Zellen und Gewebe eines Organismus verkörpert wird – für den Organismus „wirkliches Wissen“ darstellt, werden Systeme der Umgebung, die die Logik in den Strukturen des betrachteten Organismus‘ nicht kennen, die Verteilung von Teilchen und Strukturen als Unordnung wahrnehmen. Der sich entwickelnde Organismus‘ erscheint aus diesem Blickwinkel als Zunahme der Entropie. Prinzipiell kann ein Wissen über diese Strukturen existieren („potentielles Wissen“), faktisch nehmen aber äußere Beobachter nur die scheinbare Unordnung des Makrozustandes wahr [29].

Eine ähnliche Situation tritt uns im Vergleich der Strukturen von Gläsern und Kristallen entgegen. Um die tatsächliche Struktur eines Glases auf atomarer Skala zu beschreiben, bedarf es der Kenntnis aller Koordinaten der einzelnen Teilchen, mithin einer großen Menge an Information. So gesehen verkörpert das System eine große Negentropie. Dieses potenzielle Wissen könnte z.B. einen Informationsspeicher darstellen, in dem eine sehr hohe Informationsdichte gespeichert werden kann. Dieses Wissen kann aber nur eingeschrieben oder ausgelesen werden, wenn ein entsprechendes Schreib- und Lesesystem zur Verfügung steht. Hat man ein solches nicht, so kann man nur den Blickwinkel des makroskopischen Systems benutzen, und damit wird die große potenzielle Information als Unordnung wahrgenommen.

Die Produktion von Entropie und die Verteilung von Komponenten auf der atomaren bzw. molekularen Skala haben Gläser und lebende Systeme gemeinsam. Der entscheidende Unterschied besteht in den Möglichkeiten des Informationsaustauschs, d.h. den Möglichkeiten des Einschreibens und des Auslesens der Informationen. Die biologische Evolution und ihre Produkte sind deswegen nicht primär als Ausdruck von Systemen zu verstehen, die in ihrer elementaren Struktur einen großen Datensatz zur Beschreibung nötig haben, sondern als Mechanismen und

Systeme die solche Informationen auszutauschen und zu prozessieren gestatten. Auch manches, was die lebende Natur hervorbringt, wird in Unkenntnis der Zusammenhänge als Unordnung interpretiert, obwohl diese subjektive Betrachtung nur aus der mangelnden Fähigkeit des Betrachters herrührt die Information auszulesen. Diese Art von Irrtum betrifft nicht nur die Naturbetrachtung, sondern z.B. auch die Beschreibung und Bewertung von sozialen Strukturen, die sehr häufig von einem Standpunkt mangelhafter Kenntnisse der Zusammenhänge erfolgen.

## **Evolution der Systeme zur Akkumulation und zum Austausch von Informationen**

Systeme, die nur eine geringe Kapazität zur Speicherung von Information aufweisen, können zwangsläufig auch nur eine geringe maximale Entropie besitzen, weil die maximale Entropie eines Systems durch die maximal mögliche Zahl unterschiedlicher Zustände beschrieben wird. Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik ist deshalb im Hinblick auf die Bewertung eines Ordnungszustandes nur so lange allein aussagekräftig, so lange diese maximal mögliche Zahl von Zuständen konstant bleibt. Das gilt etwa für einen Raum, der eine konstante Zahl von Teilchen enthält.

Lebewesen und andere evolutionsfähige Systeme besitzen jedoch neben der Fähigkeit zur Optimierung ihres Entropieexports außerdem noch die Fähigkeit, die Zahl möglicher Zustände zu vergrößern, d.h. sich immer größere Kapazitäten zur Speicherung und Verarbeitung von Information zu beschaffen. Mit der wachsenden Zahl von Möglichkeiten wächst die maximale Entropie, die ein System besitzen kann, zugleich wächst jedoch auch der Raum für unterschiedliche systemische Zustände. Leben und Entwicklung setzen die gleichzeitige Existenz von zufälliger Variabilität und Ordnungsparametern voraus. Struktur, Muster, Unverwechselbarkeit, Individualität, Gestaltung und Entwicklungsfähigkeit finden sich weder bei minimaler noch bei maximaler Entropie. Der Spielraum zwischen totaler Ordnung und maximalem Chaos wächst jedoch mit zunehmender Zahl der Mitspieler und der Zahl der Plätze, die sie prinzipiell einnehmen können. Das Wachstum von Organismen, die Vergrößerung von Genomen, die Vermehrung von Lebewesen, ihre Ausbreitung in neue Lebensräume sind typische biologische Mechanismen zur Vergrößerung von Möglichkeitsräumen. Biologische Populationen und Lebensgemeinschaften verschaffen sich durch Wachstum, Ausbreitung und Differenzierung eine immer größere maximale Entropiekapazität. Durch den Entropieexport sorgen die Systeme gleichzeitig dafür, dass die systeminhärente Entropie begrenzt bleibt, d.h. nur einen Bruchteil der maximal möglichen Entropie annimmt. Das führt dazu, dass trotz wachsender Entropie der Informationsinhalt, der Ordnungszustand und das evolutive Potenzial lebender Systeme ebenfalls wachsen können.

Für einfach strukturierte Systeme lässt sich das relative Maß der Ordnung auch gut quantitativ angeben. Ein Beispiel dafür ist die Redundanz im genetischen Code: Mit einem Triplett von vier möglichen Nukleotiden (mit den Basen Guanin, Cytosin, Adenin und Uracil) lassen sich  $4^3 = 64$

verschiedene Codes darstellen. Diese werden jedoch – im Wesentlichen - nur zur Unterscheidung von 20 Aminosäuren genutzt. Die maximale Entropie der Nukleinsäurecodierung  $S_{\text{nuk1}}$  ist einfach:

$$S_{\text{nuk1}} / k_B = 3 * \ln(4) = 5,55 \quad (33)$$

Die maximale Entropie der Aminosäurewahl  $S_{\text{AS1}}$  ergibt sich zu:

$$S_{\text{AS1}} / k_B = \ln(20) = 3,00 \quad (34)$$

Daraus resultiert das Freiheitsmaß  $F_S$  :

$$F_S = 1 - S_{\text{AS1}} / S_{\text{nuk1}} = 0,46 \quad (35)$$

Ein verschwindend kleines Freiheitsmaß bedeutet, dass der Code keine Variationsbreite in der Interpretation zulässt. Ein Freiheitsmaß von 1 bedeutet, dass die maximale Entropie im Code zu 100 % in die maximale Entropie der Interpretation übertragen wird.

In der Informationstheorie wird die maximale Entropie  $H_{\text{max}}$  auf den Binärkode bezogen. Für die Zahl von Möglichkeiten  $N$  ergibt sich die maximale mögliche Entropie zu:

$$H_{\text{max}} = \log_2(N) \quad (36)$$

Mit dieser Größe lässt sich für Zeichenketten aus der tatsächlichen informationstheoretischen Entropie  $H$  ein relatives Maß  $H_{\text{rel}}$  für die Abweichung von der maximalen Ordnung definieren:

$$H_{\text{rel}} = H / H_{\text{max}} \quad (37)$$

In einer Bakterienpopulation von 100 Milliarden Zellen beträgt die Entropie der auf die einzelnen Zellen bezogenen Variabilität:

$$S_{\text{Zellen}} / k_B = \ln(10^{11}) = 25,328 \quad (38)$$

Die prinzipiell mögliche Variabilität in jedem einzelnen Bakteriumgenom mit einer Genomgröße von rund 4 Millionen Basenpaaren beträgt:

$$S_{\text{Genom}} / k_B = \ln(4^{4000000}) = 5\,545\,177 \quad (39)$$

Bezogen auf die prinzipielle Variationsvielfalt im Bakteriengenom beträgt das entropische Freiheitsmaß in diesem Beispiel:

$$F_{S(\text{Bakterien})} = 1 - S_{\text{Zellen}}/S_{\text{Genom}} = 0,999995 \quad (40)$$

Die Zahl vermittelt eine Vorstellung von der ungeheuren prinzipiellen Variationsbreite genomischer Information in den einfachsten Lebewesen. Zugleich vermittelt sie aber auch einen Eindruck von dem geringen Ausschnitt der relativ zu den prinzipiellen Möglichkeiten in realen Systemen auftreten kann.

Eine analoge Abschätzung lässt sich auch für die Rolle des Prinzips der genetischen Rekombination durch geschlechtliche Fortpflanzung vornehmen. Dazu nehmen wir einen Stamm von etwa 100 000 Personen an, die eine Population darstellen, in dem – der Einfachheit halber – jedes der 23 menschlichen Chromosomen in nur zwei Varianten existieren soll. Die prinzipiell mögliche genetische Variationsbreite wird durch die Zahl der Chromosomenvarianten charakterisiert:

$$S_{\text{chr}} / k_B = \ln(2^{23}) = 31,88 \quad (41)$$

Die real erreichbare Vielfalt ist durch die Populationsgröße gegeben:

$$S_{\text{pop}} / k_B = \ln(100\,000) = 11,513 \quad (42)$$

Das resultierende Freiheitsmaß ergibt sich zu:

$$F_S = 1 - (S_{\text{pop}} / S_{\text{chr}}) = 0,64 \quad (43)$$

Nimmt man mit 10 von einander deutlich verschiedenen Varianten für jedes Chromosom eine wesentlich größere genetische Variationsbreite in der Population an, so steigt das resultierende Freiheitsmaß auf 0,88, liegt also immer noch signifikant unter 1. Für eine kleine Population von nur 100 Mitgliedern rückt diese Zahl mit rund 0,95 noch deutlich näher an 1 heran. Wegen der hohen Variabilität in den einzelnen Chromosomen ist die tatsächliche Vielfalt in realen Systemen weitaus höher. Kleine Populationen sind viel schlechter als größere Population in der Lage, ihren kombinatorischen Möglichkeitsraum auszutesten, was – vor allem bei Veränderungen der äußeren Bedingungen – einen erheblichen Selektionsnachteil darstellt.

In der biologischen Evolution wurde systemische Information akkumuliert und differenziert. Die Entwicklung der Mechanismen zur Generierung, Speicherung und zum Austausch von Informationen ist naturgemäß eng mit den stofflichen Trägern dieser Mechanismen verbunden. Neben den Formen der Organismen, den biochemischen Funktionen und dem Zusammenspiel von Organismen in unterschiedlichen Lebensgemeinschaften haben sich im Zuge der biologischen Evolution auch die Mechanismen der Speicherung und des Austauschs von Informationen entwickelt. Diese Systeme vereinigen drei Wesensmerkmale: erstens den Aufbau von Strukturen, die hinreichend viele Möglichkeiten der Speicherung bieten, d.h. die prinzipiell eine große Entropie ermöglichen, zweitens die tatsächliche Speicherung von Information und damit die Schaffung einer nutzbaren Ordnung innerhalb von zahlreichen möglichen Mustern, d.h. die Minimierung der Entropie in diesem Informationsspeicher und drittens die Fähigkeit, die Information mit der Umgebung zu verbinden und durch moderate Veränderungen der Information diese anzupassen. Die Entwicklung von Organisations- und Variationsprinzipien für die systemische Information, die optimale Freiheitsmaße boten, scheint in der biologischen Evolution eine zentrale Rolle zu spielen. Diese Freiheitsmaße dürfen offensichtlich nicht zu nahe bei null und nicht zu nahe bei Eins liegen.

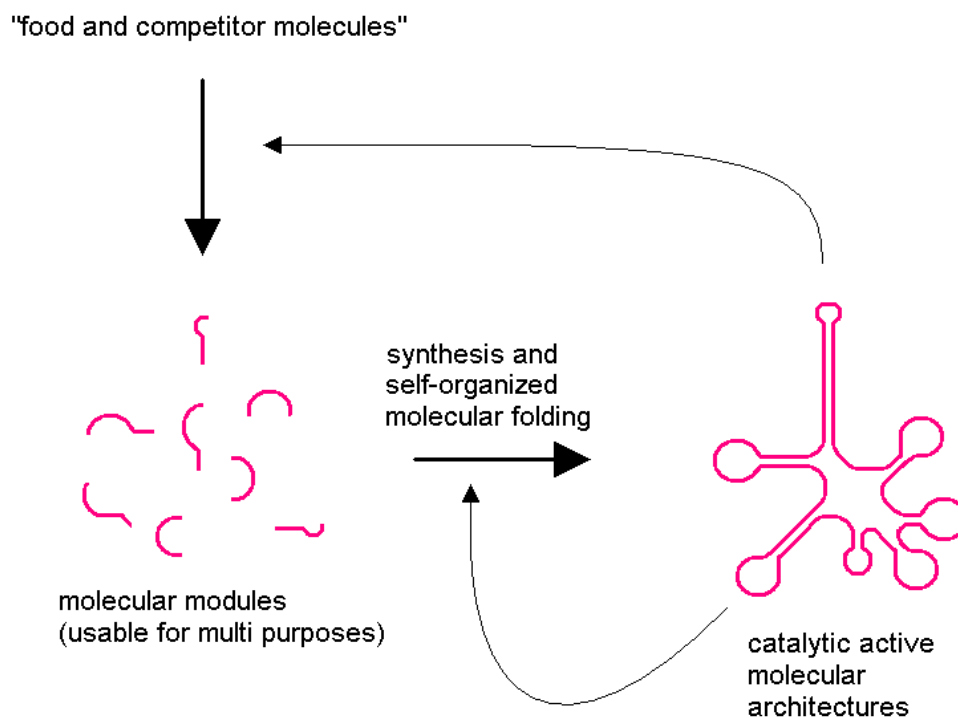


Abb. 17 Katalytische Aktivität der RNA als Kernelement der RNA-Welt-Hypothese

Der Beginn dieser Entwicklung kann momentan nur hypothetisch beschrieben werden (Abb. 17). Die RNA-Welt-Hypothese geht davon aus, dass in den frühesten lebensähnlichen Systemen die Moleküle der Ribonukleinsäure in geeigneter Form gleichzeitig Aktionseinheiten, d.h. Katalysatoren für biochemische Lebensprozesse, als auch Speicherformen für die System-inhärente Information waren. Beide Funktionen ergeben sich aus der Abfolge von vier möglichen Bausteinen, den Nukleotiden, innerhalb der linear aufgebauten RNA-Moleküle. Diese Abfolge stellt zum einen eine Zeichenkette dar, die den digitalen molekularen Informationsspeicher bildet. Zum anderen sorgt das Muster in dieser Abfolge dafür, dass sich das zunächst linear aufgebaute Molekül in eine ganz bestimmte dreidimensionale Geometrie faltet, die die biochemische Funktionalität des Moleküls ausmacht. In der Phase der RNA-Welt gab es demnach noch keine Unterscheidung zwischen Informationsspeicherung, Informations-Prozessierung und chemischer Funktion nach Stoffklassen.

Diese Situation änderte sich der RNA-Welt-Hypothese zufolge durch die biochemische Wechselwirkung zwischen RNA-Molekülen und Peptiden, die eine völlig andere Stoffklasse darstellen. Ein Teil der funktionellen Aufgaben in den frühen lebensähnlichen Formen wurde nun von den aus den Peptiden gebildeten Proteinen übernommen, weswegen sich das Aufgabenspektrum der RNA-Moleküle zugunsten der Speicherung und Prozessierung der systemischen Information verschob. Man kann diesen Vorgang als spontanen Symmetriebruch oder auch als einen spontanen „Dualisierungsvorgang“ innerhalb der frühen biochemischen Evolution

auffassen. Im Ergebnis entstanden frühe lebensähnliche Formen der zweiten Generation, deren Funktionieren auf der Komplementarität von molekularem Informationsmanagement – im Wesentlichen durch den Informationsträger RNA – und molekularem Aktions- und Reaktionsmanagement – im Wesentlichen durch Peptide und Proteine – beruhte.

Wenn diese Hypothese zutrifft, muss es in einem zweiten Dualisierungsschritt zu einer Arbeitsteilung zwischen der molekularen Informationsspeicherung und der Übertragung dieser Information auf die Aktionsmoleküle, d.h. die Proteine, gekommen sein. Während die RNA sowohl biochemische Aufgaben behielt, wurde die DNA als stabilere, weniger chemisch zerstörungsgefährdete Speicherform für die Information eingeführt. Diese höhere Stabilität und damit die bessere Eignung als Informationsspeicher beruht lediglich auf dem Fehlen einer einzigen OH-Gruppe in den Nukleotiden der DNA, so dass sich RNA und DNA sehr ähnlich sind und die systemische Information gut zwischen beiden Formen übertragen werden kann.

Die heute durchweg in allen Lebewesen anzutreffende Funktionsteilung zwischen DNA, RNA und Proteinen macht die RNA-Welt-Hypothese und die beiden in der molekularen Evolution anschließenden Dualisierungen der Funktionen sehr wahrscheinlich. Während die DNA für die Speicherung der systemischen Information zuständig ist und über sie diese Informationen durch Zellteilungen und von Generation zu Generation übertragen werden, bauen die Proteine die Zellen und Organismen auf und steuern praktisch alle biochemischen Prozesse. Nur an der Schnittstelle zwischen der DNA und den Proteinen, bei der Realisierung der genetischen Information in der Synthese der Proteine hat sich die essentielle Funktion der RNA erhalten und zwar gleich in dreierlei Form: als Transport-RNA, die die Bausteine für den Aufbau der Proteine zusammenträgt, als Boten-RNA, die die Information der DNA für die Proteinsynthese übersetzt und als ribosomale RNA, die im Wesentlichen den Syntheseapparat selbst ausmacht.

Abgesehen vom fundamentalen Charakter dieser wahrscheinlichen Vorgänge in der frühen Evolution ist die Tatsache außerordentlich bemerkenswert, dass der prinzipielle Aufbau und die prinzipiellen Funktionen der genannten drei Stoffklassen über mehr als drei Milliarden Jahre Evolution hinweg erhalten geblieben sind. Die einmal eingeführten Prinzipien sind so essentiell und stark, dass sie nicht ersetzt werden konnten und offensichtlich auch nicht abgelöst zu werden brauchten. Das spiegelt sich in der einfachen Tatsache wider, dass diese Moleküle und ihre prinzipiellen Funktionen in allen Lebewesen vom einfachsten Bakterium bis zum Menschen identisch sind. Zellteilung und die Weitergabe der systemischen Information, d.h. Vererbung, aber auch Mutation und Variation von Eigenschaften, die Anpassungsfähigkeit aller lebenden Systeme und die Evolution von Populationen, Arten und höheren biologischen Taxa basieren auf diesen elementaren Stoffklassen und den durch sie vermittelten Informationsspeicherungs- und Austauschprinzipien.

Wichtige Folgeschritte der biologischen Evolution, die der Prozessierung von Information dienen, bauen auf dem elementaren Informationsaustausch zwischen RNA, DNA und Proteinen auf. Der am



Das Prinzip der Rekombination von Information findet sich nicht nur in der Biologie, sondern auch in der modernen Technik (Abb. 19). Viele physikalische und technische Probleme lassen sich zwar in mathematische Gleichungen fassen, können aber nicht analytisch, d.h. durch einfaches Ausrechnen von Variablen gelöst werden. Hier hilft die mit Computern durchgeführte numerische Mathematik. Bei so durchgeführten Optimierungsrechnungen haben sich „evolutive“ Methoden bewährt, bei denen durch die Rekombination von Teildatensätzen eine wesentliche Erhöhung der Geschwindigkeit entsprechender Optimierungsrechnungen erreicht wird.

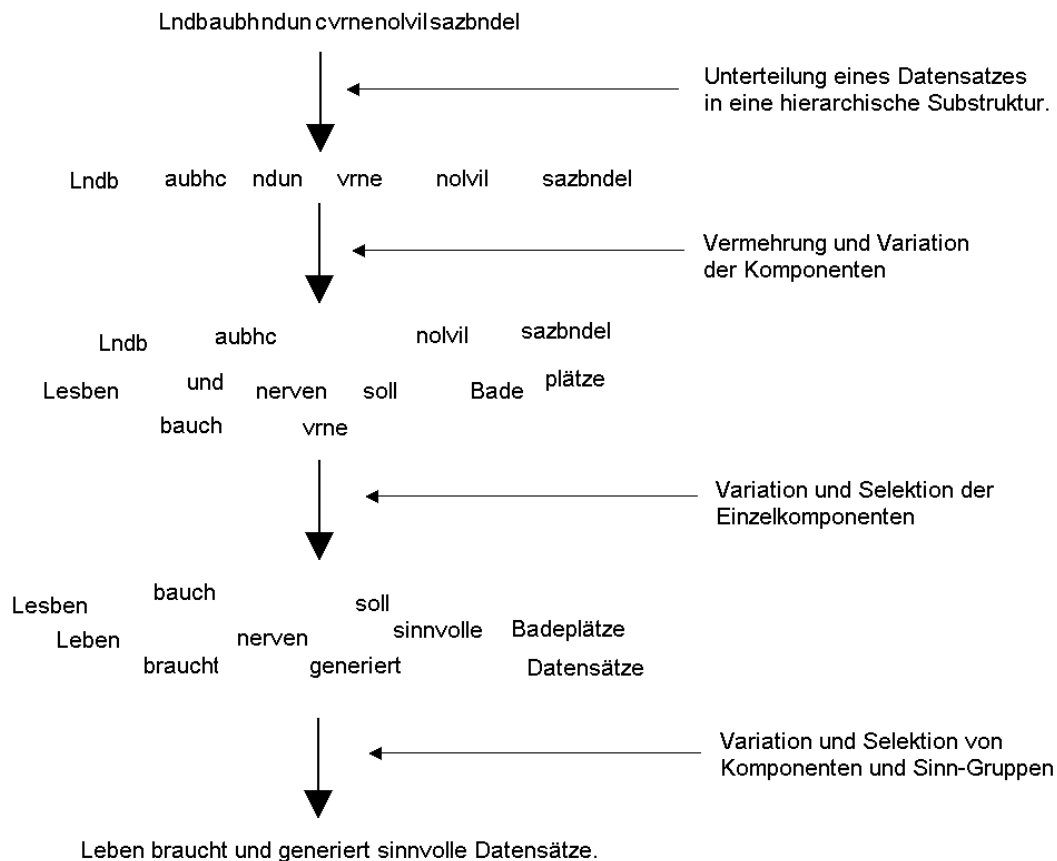


Abb. 19 Hierarchisches Informations-Management: Optimierung der Information durch Bewertung und Rekombination von Teildatensätzen

Weniger leicht als die genetische Informationsübertragung durch Nukleinsäuren lässt sich der Informationsaustausch zwischen Zellen und Organismen auf Grund von anderen chemischen, aber auch mechanischen, optischen, akustischen oder sonstigen Signalen als digitales Prinzip beschreiben. Tatsächlich hat die biologische Evolution viele verschiedene Mechanismen der Informationsübertragung hervorgebracht, die mit Hilfe von unterschiedlichen aktorischen und sensorischen Prinzipien realisiert werden. Eine der erstaunlichsten Leistungen ist dabei die Entwicklung des auf elektrischen Erregungszuständen und binärer Codierung beruhenden



Nervensystems, in dem logische Verknüpfungen ähnlich durch Netzwerke aus Elementen (Zellen) mit drei mögliche Zustände der Einzelemente (erregbar, erregt, refraktär) realisiert werden.

Sowohl archaische, chemisch vermittelte Informationsübertragungen als auch die Informationsübertragung in Nervensystemen sowie alle anderen Mechanismen stellen Ordnungsprinzipien innerhalb von Organismen bzw. Lebensgemeinschaften dar. Sie sind auf Stoffwechselfvorgänge, die Bereitstellung von Energie und den Export von Entropie angewiesen. Die Spezifität einer Information lässt sich in allen Fällen wieder durch das Verhältnis einer Gesamtzahl von Möglichkeiten  $W_0$  und die auf Grund der Information mögliche Einschränkung auf eine reduzierte Zahl von Möglichkeiten  $W$  beschreiben. Im Idealfall ist der Aufwand  $A$  minimal. Der für die Übertragung der Information erforderliche Aufwand  $A$  lässt sich in Analogie zu den oben aufgeführten Gleichungen als Produkt eines für das jeweilige Übertragungssystem charakteristischen Standardaufwands  $A_0$  und den Logarithmus des Möglichkeitsverhältnisses beschreiben:

$$A = A_0 * \ln(W_0/W) \quad (44)$$

Während für Vorgänge auf dem Niveau kleiner Teilchen – Atome und Moleküle – ein Standardaufwand durch die Boltzmannkonstante gegeben ist, lässt sich der jeweilige Standardaufwand für komplexere Mechanismen der Informationsübertragung und -verarbeitung weniger leicht ermitteln.

Die qualitativen Stufen der Höherentwicklung in der Evolution lassen sich jedoch sehr gut anhand der Mechanismen des Informationsaustauschs identifizieren (Abb. 20). Sie folgen einer gewissen Chronologie der Entwicklung von einfacheren, fundamentalen zu komplizierteren, spezielleren Prinzipien, die aufeinander aufbauen. So basiert die genetische Rekombination auf der linearen molekularen Codierung von Information in den Nukleinsäuren und deren Vererbung in der Zellteilung auf. Nervensysteme setzen mehrzellige Organismen mit ihren Vererbungssystemen voraus.

Auch die Entwicklung der Informationsaustauschsysteme in der Evolution des Menschen und seiner Kultur folgt diesem Sukzessionsprinzip. Die elementaren biomolekularen und zellulären Mechanismen sowie das Funktionieren des zentralen Nervensystems der einzelnen Individuen und seiner diversen sensorischen und aktorischen Fähigkeiten bleiben Grundlage des Funktionierens der Organismen, aber auf ihrer Basis entstanden neue Informationsübertragungsprinzipien. Im Hinblick auf die Informationsübertragung besteht das entscheidende Kriterium für den Übergang vom Tier zum Menschen in der Entstehung der Sprache. Sie erlaubt den Austausch von Informationen zwischen Individuen mit Hilfe abstrakter Begriffe. Objekte und Vorgänge, auf die sich die ausgetauschten Informationen beziehen, brauchen während der Informationsübertragung nicht anwesend zu sein. Ort und Zeit, auf die sich Informationen beziehen, müssen nicht mit Ort und Zeit der Informationsübertragung zusammenfallen, Informationen werden unabhängig vom

behandelten Objekt übertragen. Ort und Zeit sowie die die Information austauschenden Individuen werden ebenfalls begrifflich fassbar und damit Gegenstand von abstrakter Beschreibung.

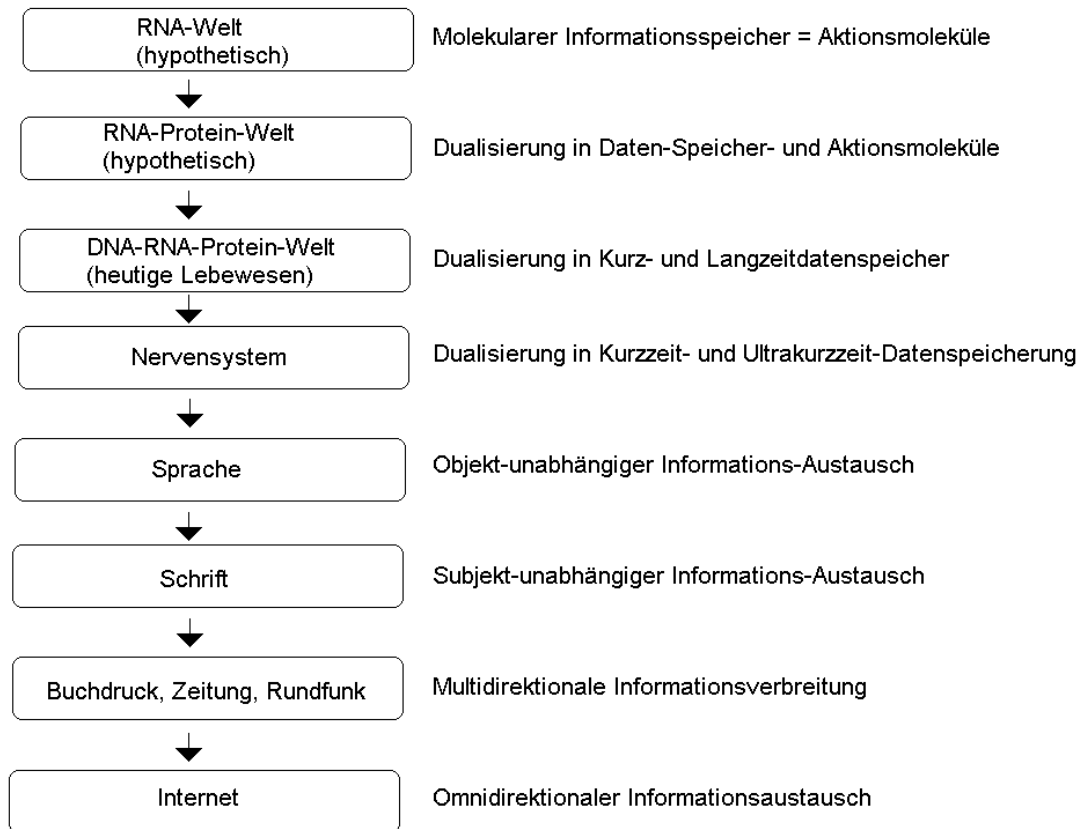


Abb. 20 Evolution der Informationsaustauschsysteme

Der nächste große Sprung in der Evolution der Informationsaustauschsysteme markiert den Übergang von der prähistorischen Kultur zur Hochkultur, der mit der Erfindung bzw. Einführung der Schrift einherging. Die symbolische Vergegenständlichung von Information löst die Information vom Individuum. Während Informationsaustausch durch das gesprochene Wort die gleichzeitige Anwesenheit eines Absenders (Sprechers) und eines Empfängers (Hörers) der Information voraussetzt, erlaubt die Schrift die Speicherung und Übertragung von Information unabhängig vom Absender und Empfänger, d.h. unabhängig von einzelnen an der Informationsübertragung beteiligten Subjekten. Der Informationsaustausch kann damit auch aus dem Zusammenhang einer kleinen sprechenden und hörenden Gruppe von Menschen, d.h. aus dem Zusammenhang persönlicher Bekanntschaft herausgelöst, und in größeren, auch anonymen Menschengruppen bzw. Gesellschaften praktiziert werden.

Die Folgeschritte der kulturellen Evolution der Informationsaustauschsysteme betreffen die Direktionalität und die technischen Werkzeuge des Informationsaustauschs. Die einmal durch einen

Autor geschriebene Information kann zwar mehrfach gelesen und gegebenenfalls auch abgeschrieben und weitergegeben werden, sie bleibt aber im Wesentlichen eine lineare Informationsübertragung zwischen einzelnen Autoren und Schreibern und Lesern. Diese Situation änderte sich mit dem quasi-industriellen Kopieren von Schriften und vor allem mit der Einführung des Buchdrucks mit beweglichen Lettern, der eine rasche Vervielfältigung von Schriftwerken ermöglichte. Mit dieser Technik wurde die Informationsweitergabe polydirektional: Ein Autor konnte gleichzeitig eine große Zahl von Empfängern erreichen. Mit der Einführung von Zeitungen und schließlich der elektronischen Informationsübertragung durch Rundfunk und Fernsehen wurde dieses Prinzip der polydirektionalen Informationsverbreitung immer effizienter. Schließlich wird heute durch das Internet eine neue Qualität des Informationsaustauschs gewonnen, indem nicht mehr nur einzelne Sender (Autoren) viele Empfänger (Hörer, Leser, Zuschauer) erreichen, sondern sehr viele Absender gleichzeitig sehr viele Empfänger informieren können. Das weltweite elektronische Netzwerk stellt damit ein „omnidirektionales Informationsaustauschsystem“ dar.

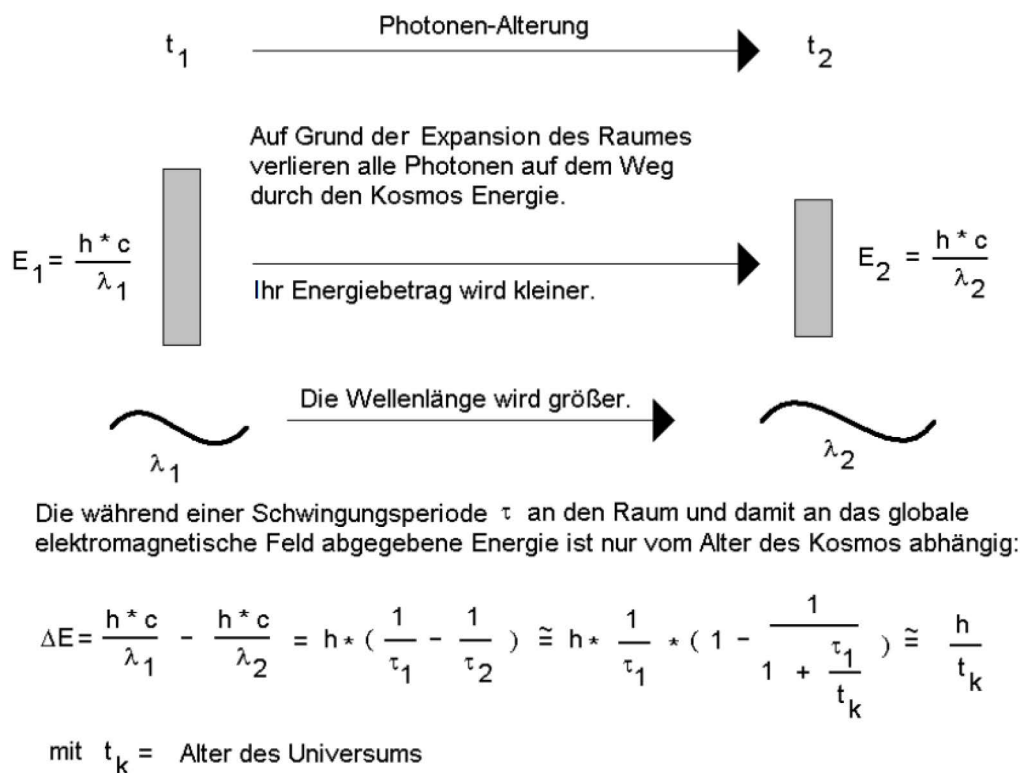
Auch die durch Schrift, Buchdruck und elektronische Kommunikation ausgetauschten Informationen sind Bestandteile eines systemischen Ordnungszustandes. Besonders, im Bereich der elektronischen Systeme und speziell im Falle der flüchtigen Speicher wird der dissipative Charakter der enthaltenen Strukturen sehr gut deutlich. Auch für alle Vorgänge des kulturellen Informationsaustauschs muss ein Preis bezahlt werden, der mit Energiedurchsatz und Entropieexport einhergeht. Ohne Bereitschaft, diesen Preis in Gestalt von Energie- und Organisationsaufwand zu bezahlen, brechen die Mechanismen des Informationsaustauschs zusammen. Der Durchsatz von Energie und Daten und die Produktion von Wärme sind die elementaren Voraussetzungen für die modernen Strukturen der Gesellschaft. Und man kann sicher davon ausgehen, dass der Durchsatz von Daten und die Produktion eines Überschusses von Daten („Datenmüll“) sowie die Notwendigkeit der Datenfilterung in ähnlicher Weise eine Voraussetzung für das Funktionieren des omnidirektionalen Informationsaustauschs sind, wie die Produktion und der Export von Entropie eine fundamentale Voraussetzung für jede Akkumulation von Information sind. Vermutlich kann auch der Filteraufwand  $F$  in Abhängigkeit vom Verhältnis der Gesamtdatenmenge (d.h. einschließlich der irrelevanten Daten)  $d_0$  zu den relevanten Daten einer Fragestellung  $d$  anhand eines Standardfilteraufwands  $F_0$  in Analogie zu den oben angegebenen Gleichungen formuliert werden:

$$F = F_0 * \ln(d_0/d) \quad (45)$$

Es ist anzunehmen, dass die weitere Evolution der Informationsaustauschsysteme zunächst vor allem durch die Evolution der Filtermechanismen geprägt werden wird.

## Kosmische Evolution

Nach unserem momentanen Kenntnisstand läuft auch auf sehr großer räumlicher und zeitlicher Skala ein irreversibler Prozess ab: Der Kosmos selbst unterliegt einer Evolution. Zentraler Ausdruck dafür ist die aus der Rotverschiebung erschlossene Expansion des Weltalls. Diese wird nach dem Standardmodell von einer allmählichen Verringerung der Energien der das Weltall durcheilenden Photonen begleitet, deren Ursache die Dehnung des Raumes ist und die auch als Abkühlung aufgefasst werden muss. Photonen „altern“, während sie ihren Weg durch das Universum nehmen. Und dieses Altern macht sich in einem Verlust an Energie bemerkbar. Auch wenn man nicht – wie in der ursprünglichen Interpretation der kosmischen Rotverschiebung – diese Alterung in einem statischen Universum ansiedelt, so muss die mit der Raumausdehnung verbundene Dehnung der Photonen mit einer Abnahme ihrer Energie verbunden sein. Man kann dieses Altern als individuellen Beitrag jedes einzelnen Photons zur Abkühlung des Universums verstehen. Die individuelle Energiebilanz ist nicht ausgeglichen. Es braucht einen fortwährend lokal wirkenden Mechanismus der Energieübertragung aus dem Photon. Ein solcher wäre nur in Gestalt einer elektromagnetischen Kopplung denkbar, in der in sehr kleinen Zeitintervallen winzige Energiebeträge in Form von Beiträgen zum äußeren elektromagnetischen Feld abgegeben werden (Abb. 21). Dieser Transfer wäre durch eine hohe Frequenz der Übertragung (Übertragungsrates) gekennzeichnet, die am ehesten mit der Eigenfrequenz der Photonen zu identifizieren ist, aber – auf Grund der sehr kleinen Energieportionen - durch eine sehr niedrige Frequenz der abgegebenen Feldenergie, also extrem langwellige Photonen erfolgen müsste.



Die pro Schwingungsperiode von jedem Photon verlorene Energie kann als Photon mit minimal möglicher Frequenz (d.h. maximal möglicher Wellenlänge) verstanden werden.

Abb. 21 „Alternde Photonen“ als Ausdruck der Kopplung des kosmologischen Zeitpfeils und seiner lokalen Wirksamkeit und digitaler Charakter des Energieverlustprozesses der „alternden Photonen“

Eine Abschätzung dieser Rückübertragung von elektromagnetischer Feldenergie von den alternden Photonen der Ausgangswellenlänge  $\lambda_1$  an den Raum führt zu Energieportionen, die Photonen mit der Wellenlänge der Ausdehnung des Universums, d.h. mit einer Frequenz der Hubblekonstante  $H$  entsprechen.

Daraus ergibt sich die Energieabgabe eines Photons pro Periode (Wellenlänge) in Form von einem (rechnerischen) Photon der Frequenz  $\gamma_T$ :

$$E_1 - E_2 = hc (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) = h \cdot \gamma_T \tag{46}$$

Oder:

$$(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) = \gamma_T / c \tag{47}$$

Die Länge der Dehnung der ursprünglichen Wellenlänge auf Grund der kosmischen Expansion steht während einer Schwingungsperiode des betreffenden Photons zu dieser Wellenlänge im gleichen Verhältnis wie die Expansion des Universums zu dessen Gesamtausdehnung in der gleichen Zeit bzw. im Verhältnis der Schwingungsperiode des Photons  $T_{ph}$  zum Alter des Universums  $t_h$ .

$$(\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda_1 = T_{ph}/t_h \quad (48)$$

Oder:

$$(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2) = T_{ph}/(t_h * \lambda_2) \quad (49)$$

Setzt man die obere und die untere Gleichung ineinander ein, so erhält man:

$$\gamma_T / c = T_{ph}/(t_h * \lambda_2) \quad (50)$$

woraus für  $\gamma_T / c = 1/\lambda_2$  resultiert:

$$\gamma_T = 1 / t_h \quad (51)$$

Grundsätzlich hat dieser Energietransfer den Charakter eines reversiblen Prozesses, denn die Entropie, die das Photon durch die Verminderung der Energie und damit die Erniedrigung seiner Äquivalenztemperatur erhält, wird durch den Verlust an Energie bei dieser Temperatur gerade kompensiert. Das würde bedeuten, dass lokal Reversibilität gewährleistet ist. Das heißt, dass jedes Photon grundsätzlich Energie aus dem globalen Feld aufnehmen und damit wieder energiereicher werden könnte. Dieser prinzipiellen lokalen Reversibilität steht aber offensichtlich eine globale Irreversibilität gegenüber, die bewirkt, dass die aus dem Proton ausgekoppelte Energie – vorstellbar in Form von extrem langwelligen Feldteilchen – global konvertiert wird und damit nicht wieder für die Einkopplung in das Photon zur Verfügung steht.

Außerdem bedingt die Expansion unter der Voraussetzung des Fehlens eines adäquaten Massenzuwachses im Kosmos eine permanente Verminderung der Materiedichte im Kosmos. Die Tatsache, dass bei der Beobachtung in sehr großer Entfernung vergleichsweise junge Strukturen angetroffen werden, gilt als wichtige Bestätigung für dieses Bild.

Im Gegensatz zu konventionellen chemischen Systemen auf der Erde ist die durchschnittliche Materiedichte im Kosmos gering, Stoßprozesse sind selten. Trotzdem gehorchen Vorgänge im Kosmos wie die Wechselwirkungen von Teilchen bei der Begegnung riesiger Gaswolken statistischen Gesetzen, wie sie durch die Boltzmann-Gleichung beschrieben werden. Doch ist eine solche Betrachtung auch auf den Kosmos als Ganzes anwendbar?

Nach dem gängigen Modell expandiert unser Kosmos, bildet Strukturen und kühlt sich dabei gleichzeitig ab. Betrachtet man den Kosmos als abgeschlossenes System, so muss nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik seine Energie konstant sein, während nach dem Zweiten Hauptsatz seine Entropie zunehmen sollte, da wir ein irreversibles Geschehen beobachten. Bei

gleichbleibender Gesamtenergie und abnehmender mittlerer Temperatur wächst die kosmische Entropie. Diese Zunahme von Entropie auf Grund der abgesenkten Temperatur kann nicht erklären, wieso wir eine zunehmende Bildung von Strukturen, mithin eine Zunahme von Information und Ordnung, also Negentropie im Kosmos vorfinden. Deshalb erscheint global gesehen die ausgeglichene Energie-Bilanz nicht plausibel. Überraschend ist an dieser Betrachtung, dass der Kosmos als Ganzes offensichtlich in der Lage ist, sich abzukühlen und dadurch Strukturen aufzubauen. Unter der Voraussetzung eines konstanten Energieinhaltes steht der Aufbau von Strukturen – die Bildung von Ordnung durch Abkühlung scheinbar im Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Will man die Gültigkeit der Hauptsätze der Thermodynamik für den Kosmos als Ganzes nicht in Zweifel ziehen, so bedeutet das: Entweder ist unser Kosmos thermodynamisch offen oder die Raumausdehnung selbst kompensiert die zunehmende Entropie und ermöglicht sogar eine Überkompensation der inneren Entropieproduktion, die zum Aufbau komplexer Strukturen und Dynamik führt.

Nach einer solchen Vorstellung wäre der Charakter des Raumes selbst für den Eintrag von Energie in den Kosmos und deren inhomogene Verteilung verantwortlich und auch für die Konsequenzen, die die Produktion von Entropie und deren inhomogene lokale Verteilung für den Kosmos hätte. Es gibt trotz einer Vielzahl von theoretischen Überlegungen bisher nur wenige physikalische Parameter, die einen Zugang zum Verständnis der Rolle des Raumes in der kosmischen Evolution bieten. Neben der gravitationsbedingten Raumkrümmung in der Umgebung schwerer Himmelsobjekte und der Rotverschiebung ist der Elektromagnetismus ein fundamentales Phänomen, das eng mit den Eigenschaften des Raumes gekoppelt sein muss. Eine empirische Beziehung lässt sich dabei durch den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von photonischer Energie  $E_{ph}$  zu elektrischer Energie  $E_{el}$  und den Dimensionen des Kosmos  $l_k$  in Relation zur Plancklänge  $l_p$  als elementarer Länge angeben:

$$E_{ph} / E_{el} \approx \ln\{l_k / [8\pi * l_p]\} \quad (52)$$

Es ist unschwer zu erkennen, dass auch diese Gleichung der allgemeinen Form der oben diskutierten Gleichungen gehorcht:

$$Y/Y_0 = \ln(W_0/W) \quad (53)$$

Das dabei auftretende Verhältnis  $Y/Y_0$  entspricht etwa dem Reziprokwert der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante  $\alpha$ .

Der Vorstellung eines annähernd linear expandierenden Universum zufolge korrespondiert die kosmische Längenausdehnung  $l_k$  mit der Lebensdauer des Kosmos  $t_k$ , die sich als inverse Hubblekonstante darstellen lässt. Dadurch kann die obige Gleichung auch auf die momentane Lebensdauer des Kosmos' als Funktion der Planckzeit  $t_p$  angewendet werden:

$$t_k \approx 8\pi * t_p * e^{(Y/Y_0)} \quad (54)$$

Falls das Verhältnis von  $Y_0/Y$  als Näherungswert für  $\alpha$  interpretiert werden darf, ließe sich diese Größe als eine Funktion des Alters des Kosmos' auffassen:

$$1/\alpha \approx \ln [ t_k / (8\pi * t_p) ] \quad (55)$$

Im Rahmen der bisherigen Modellvorstellungen zum Kosmos konnte eine solche zeitliche Änderung der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante  $\alpha$  bisher jedoch nicht nachgewiesen werden.

Die heutigen Probleme bezüglich des Verständnisses des Kosmos' als thermodynamisch offenes oder geschlossenes System werden bei der Annahme einer kosmischen Evolution aus einem sehr kleinen Raumbereich heraus – der Urknall-Hypothese - durch die Tatsache einer enorm hohen Massendichte zum Anfangszeitpunkt weiter verschärft. Als Ausweg wurde das Modell der sogenannten inflationären Phase entwickelt, die die Frühphase der kosmischen Entwicklung beschreibt [30].

Ein anderer Ansatz zur Lösung des Widerspruchs, die steady-state-Theorie, wurde schon zeitig durch den Astrophysiker Fred Hoyle vorgeschlagen, der einen ständigen Masseneintrag in das Universum für möglich hielt [31]. Alle seine Versuche des Nachweises eines solchen – auch heute noch ablaufenden – Masseneintrags scheiterten jedoch.

Die offensichtlichen Widersprüche im modernen kosmischen Weltbild fordern auch radikal andere Lösungsansätze voraus. So gibt der Astrophysiker Hans-Jörg Fahr zu bedenken, dass auch eine von der Expansion des Universums abweichende Interpretation der Rotverschiebung in Betracht gezogen werden muss [32].



## Teil III: Entropie und Umwelt

### Zeitskalen der Kohlenstoffkreisläufe

Die aktuelle Diskussion über CO<sub>2</sub>-Ausstoß, und Treibhauseffekt hat vor allem das Problem der nicht-nachhaltigen Energieerzeugung im Blick. Die Ursache des Problems liegt in der stofflichen Natur der Energiereserven, die im industriellen Zeitalter vorrangig für die Energieproduktion genutzt werden und die kohlenstoffhaltigen Rohstoffe betreffen. Um diese Nutzung ökologisch richtig einzuordnen, ist ein Blick auf die natürlichen Vorgänge hilfreich, die die Umwandlung von Energie in energiereiche kohlenstoffhaltige Materialien und umgekehrt die Freisetzung von Energie durch Oxidation dieser Materialien betreffen. Beide Prozesse laufen in der Natur permanent ab und sind Bestandteil globaler natürlicher Stoffkreisläufe.

Der wichtigste natürliche Umsatz von Kohlenstoff findet sich in der durch Sonnenlicht getriebenen Fixierung des Kohlenstoffs aus Kohlendioxid bzw. Kohlensäure in den bioorganischen Stoffen, die durch die Photosynthese gebildet werden und in der Oxidation dieser Stoffe durch Sauerstoff bei der Atmung. Das Zusammenspiel von Photosynthese und Atmung im globalen Ökosystem sorgt für eine weitgehend ausgeglichene Stoffbilanz. Das durch Atmung ins Wasser und in die Luft abgegebene Kohlendioxid wird im Mittel wieder durch die Photosyntheseaktivität in bioorganischen Stoffen gebunden. Die mittlere Verweilzeit der bei diesen Vorgängen beteiligten CO<sub>2</sub>-Moleküle in der Luft beträgt etwa 20 Jahre. Die mittlere Verweilzeit von Kohlenstoff im Boden und in der Pflanzendecke ist sehr stark von der Temperatur und anderen klimatischen Faktoren abhängig. Sie beträgt bei hohem Stoffumsatz in tropischen Gebieten nur etwa vier Jahre, steigt mit höheren Breiten an und liegt im Periglazialbereich der polnahen Regionen bei etwa 400 Jahren.

Auf größeren Zeitskalen haben sich in der Erdgeschichte jedoch deutlich stärkere Änderungen des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Atmosphäre abgespielt. So wechselt der Kohlendioxidgehalt im Rhythmus der glazialen Phasen während des Eiszeitalters (Pleistozän) beträchtlich zwischen Werten von etwa 200 und 350 ppm (0,02 – 0,035%). Dieser starke Wechsel ging mit dem Wechsel zwischen hoher globaler Vereisung und dazwischenliegenden Warmzeiten einher und betrifft eine Zeitskala von rund 100 000 Jahren. Geht man in der Erdgeschichte noch weiter zurück – etwa bis ins Mesozoikum, so begegnen lange Phasen mit CO<sub>2</sub>-Gehalten der Atmosphäre von über 1000 ppm. Das betrifft dann Zeiträume von mehreren 10 bis 100 Millionen Jahren. Die starken Änderungen des CO<sub>2</sub>-Gehaltes und der Zusammenhang seiner Schwankungen mit diesen großen Zeitskalen kann nicht allein durch eine Verschiebung des Verhältnisses von Photosyntheseaktivität und Atmung erklärt werden. Vielmehr erklären sie sich durch weitere Stoffkreisläufe in die der Kohlenstoff eingebunden ist, und

deren charakteristische Zeitskalen (Abb. 22) nicht durch die biologische Stoffwechselaktivität, sondern durch geologische Prozesse bestimmt werden.

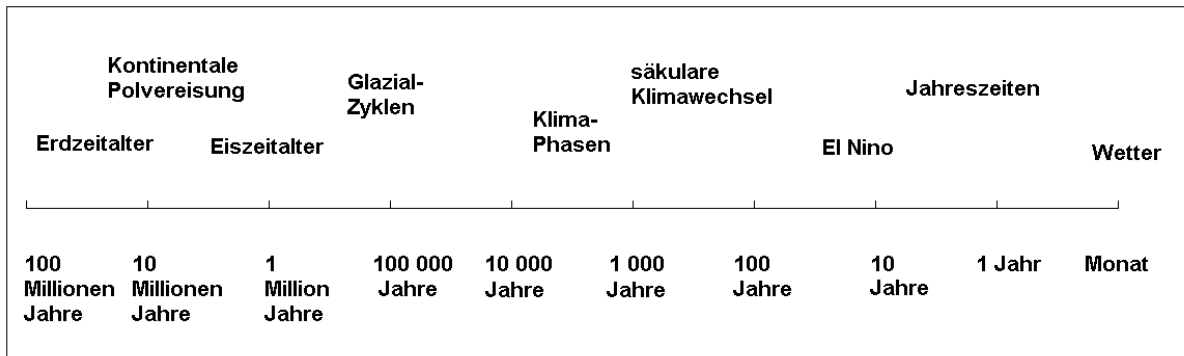


Abb. 22 Charakteristische Zeitskalen des Klimageschehens

Eine langfristige Fixierung von Kohlenstoff, d.h. eine Bindung für geologische Zeiträume, erfolgt durch Ablagerung kohlenstoffhaltiger Stoffe in den Sedimenten. Die natürliche Freisetzung aus diesen Sedimenten ist an die Bewegung der Erdkruste und damit an tektonische Vorgänge gebunden, die im Zusammenhang mit der Plattenbewegung erfolgen. Erst durch thermische und chemische Beanspruchung – vor allem im Zusammenhang mit Subduktion, d.h. dem Hinabdrücken von Sedimentschichten in Bereiche des Erdmantels – wird der Kohlenstoff aus diesen Sedimenten wieder freigesetzt und überwiegend in Form von CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre abgegeben. Daraus erklären sich die langen charakteristischen Zeiträume von der Größenordnung von mehreren hundert Millionen Jahren.

In diesem langfristigen Kohlenstoffkreislauf gibt es zwei Hauptäste. Der eine betrifft die Bindung und Speicherung des Kohlenstoffs in seiner oxidierten Form, d.h. als Carbonat. So wird er etwa in den Kalksteinen und im Dolomit angetroffen. Diese Materialien, die in großen Mengen in der Erdkruste vorkommen und ganze Gebirge aufbauen, sind Produkte biologische Aktivität und Sedimentation, die ausgehend von CO<sub>2</sub> als Carbonat in solchen Gesteinsschichten gespeichert und damit der Erdatmosphäre und biologischen Stoffwechselprozessen entzogen werden.

Der zweite Ast betrifft die Bindung des Kohlenstoffs in elementarer Form, als Kohlenwasserstoffe oder Übergangsformen, d.h. Sedimente in denen Kohlenstoff reduziert vorliegt. Auch diese Form der Kohlenstoff-Fixierung spielt sich auf langen geologischen Zeitskalen ab. Im Unterschied zu der erstgenannten Form der Fixierung wird das durch Photosynthese gebildete organische Material aber nicht oxidiert, sondern gelangt in sauerstoffarmen Böden und Gewässern in reduzierter Form in die Sedimente. Diese Sedimente bilden die heute genutzten Lagerstätten von fossilen Energieträgern. Die natürliche Freisetzung aus solchen Sedimenten erfolgt ebenso wie bei den karbonatischen Sedimenten durch tektonische Vorgänge, die an die Kontinentaldrift gebunden sind, sie sich auf der Skala von Jahrhundertmillionen abspielt.

Die durch die Natur vor vielen Millionen Jahren in den Kohle-, Erdöl- und Erdgaslagerstätten gebundenen stofflichen Energieträger sind indirekte Produkte der damaligen Photosynthese. In früheren Erdzeitaltern haben Pflanzen und Mikroorganismen Sonnenlicht aufgenommen und genutzt, um energiearmes Kohlendioxid zu den energiereichen organischen Stoffen umzuwandeln. Dabei wurde der Entropieexportweg genutzt, der sich aus der Aufnahme kurzwelliger, d.h. energiereicher Photonen der Sonnenstrahlung und der Abgabe langwelliger, d.h. energieärmerer Photonen der Infrarotstrahlung an das kalte Weltall ergibt. Deshalb stellen die heute genutzten Lagerstätten fossiler Energieträger Entropieexport-Reserven dar, die vor sehr langer Zeit angelegt worden sind und deren Bildung selbst oft über Jahrhunderttausende ablief.

Auch die Temperaturdifferenz zwischen dem Erdinneren und der Erdoberfläche stellt prinzipiell eine Entropiesenke dar, die für den Entropieexport genutzt werden kann, ohne dass Rohstoffe verbraucht oder umweltschädliche Produkte gebildet werden. Diese Nutzung spielt heute bereits eine wichtige Rolle, wenn geothermal aufgeheiztes Wasser oder magmatische Massen nahe an die Oberfläche kommen. So kann dieses Potential in vulkanisch aktiven Bereichen wie auf Island in Geothermalkraftwerken genutzt werden.

## **Zeitskalen der Atmosphären und Klima-Entwicklung**

Obwohl die Atmosphäre sowohl in mechanischer wie in chemischer Hinsicht ein hoch dynamisches System darstellt, reagiert sie auf einen Teil der stofflichen Veränderungen verhältnismäßig träge. Das hat seine Ursache in den unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten, mit denen Substanzen durch natürliche Vorgänge in der Atmosphäre abgebaut oder ihr durch die Wechselwirkung mit den Ozeanen und der Biosphäre entzogen werden. Für die Bedeutung der einzelnen Substanzen für stabile Umweltverhältnisse sind neben der mittleren Verweilzeit natürlich auch die Raten der Bildung und der Ort und die ortsabhängigen Mechanismen der Entstehung wichtig. So beträgt die Lebensdauer von Ozon in der Troposphäre nur wenige Tage bis Wochen [33]. Dagegen regeneriert sich das durch Ozonkiller-Gase wie die gemischt halogenierten leichten Kohlenwasserstoffe in den höheren Breiten während der Wintermonate zerstörte Ozon der Stratosphäre durch die Sonneneinstrahlung während der Sommermonate nur partiell. Die Lebensdauer des stratosphärischen Ozons ist extrem stark von der Anwesenheit von Ozonkiller-Radikalen abhängig. Deren Konzentration in der Atmosphäre ist zwar niedrig (bei den meisten relevanten Substanzen im sub-ppb-Bereich, d.h. weniger als 1 Teil auf eine Milliarde. Aber die mittleren Verweilzeiten liegen im Bereich von Jahren bis Jahrzehnten. Die Verweilzeit von Fluortrichlormethan beträgt rund 100 Jahre, die von Schwefelhexafluorid – einem extrem stark Treibhaus-wirksamen Gas, das z.B. in der Halbleitertechnologie eingesetzt wird – sogar 3200 Jahre. Da die Ozon-Killergase und die aus ihnen gebildeten Radikale beim Ozonabbau als Katalysatoren fungieren, gehen sie immer wieder unverändert aus der Reaktion hervor, und es genügen Spurenanteile, um das stratosphärische Ozon drastisch auszudünnen.

Die meisten dieser Gase werden nicht durch natürliche Prozesse gebildet und kamen daher vor der Industrialisierung nicht in der Atmosphäre vor. Da eine technische Entfernung dieser Spurengase aus der Atmosphäre ausgeschlossen ist, bedeutet die Entlassung solcher Substanzen in die Atmosphäre eine Veränderung gegenüber dem natürlichen Zustand, die schon auf Grund der Verweilzeit über Jahrzehnte bis Jahrhunderte hinweg Nachwirkungen auf den Treibhauseffekt, damit auf das Klima und den Ozonhaushalt hat und sich unter Umständen sogar Jahrtausende lang auswirkt.

Die Relevanz für Treibhauseffekt und Klima wird neben der Verweilzeit in der Atmosphäre vor allem durch die produzierte und freigesetzte Menge der einzelnen Gase bestimmt. Kohlendioxid ist deshalb für die Klimaentwicklung besonders relevant. Obwohl dieses Molekül nur etwa ein Tausendstel der Klimawirksamkeit wie die oben genannten Halogenkohlenwasserstoffe hat, ist es auf Grund seiner millionenfach höheren Konzentration rund tausendmal bedeutsamer für den Treibhauseffekt. Mit seiner mittleren atmosphärischen Verweilzeit von etwa 20 Jahren trägt CO<sub>2</sub> zwangsläufig zu einer relativ trägen Antwort der Atmosphäre auf die den anthropogenen Einfluss bei. Die Zeitskala der Auswirkung auf das Klima wird durch die Wechselwirkung der Atmosphäre mit den Gewässern weiter deutlich gestreckt, da die Auflösung des Kohlendioxids im Wasser und der Transport in den Ozeanen zwar einen erheblichen Teil des atmosphärischen Kohlendioxids puffert, dieser Prozess und die Vorgänge der geologischen Fixierung von CO<sub>2</sub> in Gestalt von biologisch oder anorganisch gebildeten Carbonaten in den Gewässern noch wesentlich länger dauert. Daraus resultiert eine Zeitskala für die Klimawirksamkeit von Kohlendioxid, die nicht nur im Bereich von Jahrhunderten, sondern im Bereich von Jahrtausenden liegt.

Als eine obere Grenze für die durch die Verweilzeiten der Treibhausgase wie Kohlendioxid und Methan unter Rücksicht auf längerfristige Rückkopplungen mit den Ozeanen gebildete Zeitskala kann die Periode der eiszeitlichen Klimaschwankungen angesetzt werden. Die atmosphärischen Schwankungen der Konzentrationen von Kohlendioxid und Methan, die man zeitaufgelöst aus Eisbohrkernen ermittelt hat, korrelieren sehr gut mit den langfristigen Temperaturschwankungen während des Wechsels zwischen den Eiszeitstadien (Glazialen) und den Zwischenwarmzeiten (Interglazialen). Diese liegen bei Perioden von rund 100 000 Jahren (Abb. 22). Zu der Periodizität der eiszeitlichen Klimaschwankungen tragen neben den Treibhausgasen weitere Faktoren bei, so die Bewegungen der Erde im Kosmos, die Dynamik der Biosphäre und wahrscheinlich auch geologische Faktoren. Bedeutung kommt auf der Größenordnung der eiszeitlichen Klimaschwankungen der Präzessionsbewegung der Erdachse zu, die durch eine Umlaufzeit von 26 000 Jahren geprägt ist, was etwa einem Viertel der glazialen Periodizität entspricht und die „Platonisches Jahr“ genannt wird.

Umgekehrt geben die eiszeitlichen Klimaschwankungen ihrerseits eine Zeitskala vor, die von größter Bedeutung für die Entwicklung der Biosphäre und der Atmosphäre ist. Die periodische eiszeitliche Änderung der mittleren Jahrestemperatur, des Meeresspiegels, der Niederschlagsverhältnisse und der Vegetationszonen wirkt sich drastisch auf die Stoffkreisläufe aus. Dabei spielen die Veränderungen der lokalen und globalen Transportbedingungen eine wichtige Rolle. Diese

schließen die großräumigen atmosphärischen Strömungen und die ozeanische Zirkulation ebenso ein wie die veränderten Bedingungen für Erosion und Bodenbildung und die damit verbundene Verlagerung von Mineralien und Sedimenten.

Die Ökosysteme sind in ihrer Dynamik natürlicherweise an die geologischen Vorgänge und Klimaveränderungen gekoppelt. Sie entwickeln dabei jedoch eine Eigendynamik, die sich mit den geologischen und klimatischen Prozessen überlagert und die eigene Zeitskalen hervorbringt. Diese Zeitskalen äußern sich z.B. in den Abläufen der Neubesiedlung von Landoberflächen nach dramatischen Ereignissen wie Überflutungen oder permanenter Regression des Meeres, nach Flächenbränden und Vulkanausbrüchen. Je nach klimatischen Verhältnissen, vor allem Temperatur und Niederschlag und den Bodenbedingungen kann die Neubesiedlung innerhalb einiger Jahrzehnte ablaufen oder auch Jahrtausende bis Jahrzehntausende in Anspruch nehmen. In semiariden Gebieten gehen die Bodenbildung und die Ausbildung einer Vegetationsdecke in der Regel sehr langsam vonstatten, während diese Prozesse in den Tropen sowie in den gemäßigten Zonen mit ausgeprägten Jahreszeiten und ausreichender Feuchtigkeit viel schneller ablaufen. Trotzdem kann auch dort die Entwicklung eines Biotops von der Pioniervegetation bis zum Reifestadium (Klimax) mehrere Jahrhunderte und unter Umständen Jahrtausende in Anspruch nehmen. Das ergibt sich z.B. durch die langen Generationszeiten einzelner Organismengruppen und durch eine besondere Langlebigkeit ökosystemrelevanter einzelner Organismen, die z.B. im Falle von manchen Pilzen und Bäumen auch Jahrtausende betragen kann.

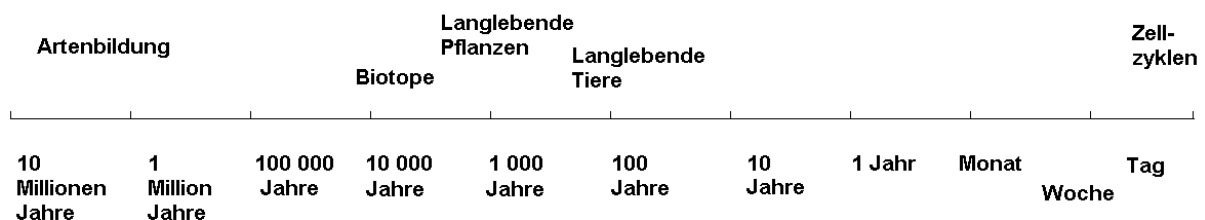


Abb. 23 Charakteristische biologische Zeitskalen

Die Dynamik natürlicher Ökosysteme ist typischerweise durch eine Hierarchie von Zeitskalen geprägt (Abb. 23). Diese baut auf den kurzen Generationszeiten von Mikroorganismen auf, die z. T. weniger als eine Stunde betragen und dazu führen, dass sich aus einzelnen Zellen große Populationen innerhalb weniger Tage entwickeln können. Andere Mikroorganismen und Kleinlebewesen, wie z.B. Insekten haben Generationszeiten zwischen Tagen und Wochen. Größere Organismen folgen dem Jahresrhythmus oder haben – wie viele Wirbeltiere und Gehölze – Generationszeiten von Jahren bis Jahrzehnten. Da die Etablierung von Populationen und komplexen Lebensgemeinschaften im Allgemeinen viele Generationen in Anspruch nimmt, erklärt sich leicht, dass typische Zeitskalen, auf denen Ökosysteme durch Anpassung auf Umweltveränderungen reagieren, im Bereich von Jahrhunderten bis Jahrtausenden liegen.

Jenseits der glazialen Klimaschwankungen liegen geologische Zeitskalen, die mit der langfristigen Dynamik der Eisschilde zusammenhängen. Die Vergletscherung der Antarktis begann bereits im mittleren Tertiär und ist damit über 20 Millionen Jahre alt. Während die Gletscher der Hochgebirge ihre Größe im Rhythmus säkularer Klimaschwankungen, d.h. im Laufe einiger Jahrhunderte, verändern und die globale Gesamtvergletscherung auf der Skala der Eiszeitstadien, d.h. der oben genannten Jahrhunderttausend-Skala schwankt, bewegt sich die Dynamik des Entstehens der großen Inlandgletscher auf der Skala von Jahrmillionen.

Das Eiszeitalter – Pleistozän – wird von den Geologen im Zeitraum der letzten 2,7 Millionen Jahre gesehen. Diese Zeitspanne entspricht dem Zeitraum der periodischen Vergletscherung und Eisvorstöße in den nördlichen höheren Breiten. Die langfristige Abkühlung der Erdatmosphäre als Ganzes wird jedoch maßgeblich durch die Vergletscherung der polnahen Kontinentalmassen und damit hauptsächlich durch die antarktische Vereisung bestimmt. Der Beginn der antarktischen Vereisung legt den Umbruch von einer langfristigen warmen erdgeschichtlichen Phase in die bis in die Gegenwart reichende kühlere Phase fest. Letztere dauert bereits seit dem Oligozän, d.h. dem mittleren Tertiär an und ist damit bereits jetzt eine Größenordnung länger als das geologisch definierte Pleistozän. Als Hauptursache für den langfristigen klimatischen Wechsel wird die polnahe Lagerung der großen antarktischen Landmasse gesehen. Die Lage dieser Landmasse ist jedoch – wenn man sie auf einer hinreichend großen Zeitskala betrachtet – auch nicht fixiert, sondern unterliegt der Kontinentaldrift. Die Größenordnung der Zeitskala dieser Bewegung der Kontinentalplatten der Erdkruste liegt im Bereich von mehreren hundert Millionen Jahren, also noch einmal gut eine Größenordnung über der Dauer der heutigen antarktischen Vereisung. Tatsächlich hat es auf der Erde immer wieder Vereisungsphasen gegeben – etwa im frühen Proterozoikum vor über zwei Milliarden Jahren - und im jüngeren Präkambrium vor etwa 800 Millionen Jahren. Dazwischen lagen lange Perioden, die von überwiegend hohen Temperaturen und weitgehender Eisfreiheit der Erdoberfläche geprägt waren.

Nicht nur die geologischen Strukturen der Erde, Gletscher und die Verteilung von Meer und Land, sondern auch die einzelnen Lagerstätten und Ökotope sind Ergebnis des spontanen Aufbaus von Ordnung, für die in mehr oder weniger weit zurückliegenden Perioden Energie durchgesetzt und Entropie exportiert worden ist. Jedes funktionierende – d.h. in seiner Dynamik robuste – Ökosystem, jede Lagerstätte – d.h. jeder Raum mit einem bestimmten, separat von anderen Stoffen abgelagertem Material – stellt eine solche Ordnungsstruktur dar, die auch als Entropieexportreserve verstanden werden kann. Das gilt letztlich auch für die globale Ökosphäre mit ihrer Mischung aus verschiedenen Landschaften, Ökosystemen, Böden, Lagerstätten und der in ihrer Gaszusammensetzung biologisch geprägten und durch die langfristige biologische Aktivität auf der Erde gebildete Atmosphäre.

Mit der wirtschaftlichen Nutzung von Lagerstätten und Oberflächenbereichen auf der einen Seite und der Umwandlung und Zerstörung von Biotopen sowie der Veränderung der Zusammensetzungen von Gewässern, Böden und der Luft auf der anderen Seite greift die

Menschheit diese Ordnungsstrukturen und Entropieexportreserven, die oft über geologische Zeiträume hinweg entstanden sind, an. Dabei erfolgen diese Eingriffe praktisch immer ohne Nachhaltigkeit, d.h. als unumkehrbare Veränderung. Lediglich die natürlichen Prozesse selbst, die zum Aufbau dieser Ordnungsstrukturen geführt hatten, wären in der Lage die menschlichen Eingriffe zu kompensieren. Diese Tatsache und der Fakt, dass nicht die Wiederherstellung eines früheren Zustandes, sondern die Passfähigkeit zu einem sich selbst regulierenden globalen Ökosystems Maßstab des Handelns sein muss, lässt die Diskrepanz zwischen den Zeitskalen der Entstehung bzw. Regenerierung der natürlichen Entropieexportreserven und ihrer Ausbeutung bzw. Zerstörung zu einem geeigneten Kriterium für ihre kritische Bewertung werden.

Für die aktuelle wirtschaftliche, soziale und politische Situation mag es auf den ersten Blick unerheblich sein, ob einzelne unnachhaltige Verhaltensweisen eine Zeitskala von hundert, tausend, hunderttausend oder gar hundert Millionen Jahren betrifft. Ganz anders stellt sich das Problem nicht-nachhaltigen Wirtschaftens dar, wenn man unser Verhalten an der langfristigen Überlebensperspektive der Menschheit und die der Biosphäre als Ganzem misst. Es ist zu erwarten, dass mit wachsendem Wohlstand, wachsender Bildung und wachsendem globalen Verantwortungsbewusstsein in der Weltbevölkerung auch die Aufmerksamkeit gegenüber langfristigen Entwicklungsfehlern weiter zunehmend eine politische Rolle spielen wird. Darauf haben Wirtschaft und Politik, aber auch Lebensstil, Konsum- und Solidaritätsverhalten jedes einzelnen Menschen Rücksicht zu nehmen. Verantwortungsvolles Handeln verlangt, sich über die langfristigen Konsequenzen der Nutzung natürlicher Ressourcen und der Verschiebung des globalen Zustandes klar zu werden. Dabei macht es im Hinblick auf Planung und Wirtschaften einen großen Unterschied, ob das Ökosystem Erde die Chance hat, Fehleingriffe innerhalb von Jahrhunderten oder erst nach Jahrmillionen zu korrigieren oder ob überhaupt irreversible Prozesse ablaufen, die auch nach sehr langen Zeiträumen keine Korrektur mehr ermöglichen.

Einige Klimaforscher sind durchaus der Meinung, dass starke Störungen der irdischen Energiebilanz durch Eingriffe in die Atmosphärenzusammensetzung weitaus kritischere und unumkehrbare Konsequenzen haben könnten als „nur“ eine globale Erwärmung um einige Grad, das Abschmelzen der polaren Eiskappen, einen drastischen Anstieg des Meeresspiegels und eine Verschiebung der Klimagürtel. Das für das globale Ökosystem der Erde dramatischste Szenario wäre ein sich selbst immer weiter beschleunigender Treibhauseffekt. Dieser könnte in Venus-artige Verhältnisse für unsere Atmosphäre münden: verkochende Ozeane, Unmassen von Wasserdampf in einer glühend heißen Atmosphäre, unvorstellbare Stürme und Temperaturen weit oberhalb der Siedetemperatur des Wassers, bei denen keinerlei Leben mehr möglich ist.

Der Erwartung eines solchen Schreckensszenarios steht die Einsicht gegenüber, dass das Zusammenspiel der biologischen Komponenten unseres irdischen Ökosystems während der letzten Jahrhundertmillionen der Erdgeschichte immer wieder stabilisierend auf das Erdklima gewirkt hat. So hat die biologische Aktivität sehr langfristig dazu geführt, dass der Treibhauseffekt in der Atmosphäre durch eine Reduzierung von Treibhausgasen immer weiter vermindert wurde. Diese

langfristige Reduktion war außerordentlich wichtig, weil auf der Skala von Jahrmilliarden die Sonne allmählich mit immer höherer Intensität Energie abgibt und damit auch die Solarkonstante, also die pro Quadratmeter Erdoberfläche und Jahr empfangene Energie auf der Erde ansteigt. Ohne die Reduzierung des atmosphärischen Treibhauseffekts durch die Biosphäre wäre die Erde wahrscheinlich schon heute ein „running green house“ mit lebensfeindlich heißen Verhältnissen.

Die durch die lebende Natur entwickelte und erhaltene Atmosphärenzusammensetzung stellt einen Ordnungszustand von fundamentalem Wert für das Ökosystem Erde dar. Als Grundlage für die Erhaltung lebensfreundlicher Bedingungen auf der Erde bilden diese atmosphärischen Verhältnisse einen Zustand reduzierter Entropie. Sie sind Ergebnis eines langfristigen Entropieexports aus dem globalen atmosphärischen System. Dieser Entropieexport ist durch die lebende Natur geleistet worden, indem der dafür erforderliche Entropiefluss über den Empfang von Sonnenergie und der darauf basierenden Photosynthese und der durch diese ermöglichten globalen Stoffkreisläufe sowie die thermische Abstrahlung ins Weltall organisiert wurde.

Besonders bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass das Ökosystem Erde dabei lebensfreundliche atmosphärische Verhältnisse zwischen einem zu großen und einem zu kleinen Treibhauseffekt austariert, obwohl sich langfristig die Bedingungen auf Grund der zunehmenden Sonneneinstrahlung immer weiter in einer Richtung ändern. Zum einen wurden CO<sub>2</sub> und noch stärker wirksame Spurengase in der Atmosphäre so weit reduziert, dass eine Überhitzung vermieden wurde. Zum anderen blieb aber ein ausreichender Treibhauseffekt erhalten, der dafür sorgt, dass die mittlere Jahrestemperatur der Erde bei etwa 15°C liegt und damit rund 30 Grad über der Temperatur, die zu erwarten wäre, wenn es gar keinen Treibhauseffekt gäbe und die ein völliges Einfrieren der Erdoberfläche bedeuten würde.

Ein wichtiges Anzeichen für das „Austarieren“ der durch die Treibhausgaskonzentrationen kontrollierten Erdmitteltemperatur ist die vergleichsweise geringe Menge von CO<sub>2</sub>, mit der die Ökosysteme und insbesondere die für ihren Stoffwechsel auf das CO<sub>2</sub> angewiesenen Photosyntheseaktiven Organismen zurechtkommen. Man muss sich nur vor Augen führen, dass wir Menschen als Sauerstoff-atmende Lebewesen für diese Atmung permanent eine Luft von rund 21% Sauerstoffgehalt zur Verfügung haben, aus der wir den Sauerstoff reichlich schöpfen können. Demgegenüber steht den grünen Pflanzen und den Mikroorganismen, die Photosynthese betreiben, heute nur eine atmosphärische Kohlendioxidkonzentration von rund 0,04% zur Verfügung, aus der sie für den Aufbau organischen Materials zehren müssen. Während Sauerstoffmoleküle in der Atmosphäre mehr als 20 000 Jahre verweilen, bevor sie im Mittel von lebenden Organismen aufgenommen werden, müssen die CO<sub>2</sub>-Moleküle in Zyklen von wenigen Jahrzehnten umgesetzt werden, d.h. auf einer Zeitskala, die kürzer als die Lebensdauern mancher Organismen und deutlich kürzer als die charakteristische Zeitskala der Entwicklung vieler Ökosysteme ist. Dieses „Feintuning“ verlangt uns Menschen höchsten Respekt vor dem Funktionieren der Kopplung zwischen Biosphäre und Atmosphäre ab.



Offensichtlich hat sich in der Entwicklung des Austarierens des Treibhauseffekts in den letzten rund zweihundert Millionen Jahren noch eine wichtige Entwicklung vollzogen. Während die Photosynthetiker über die langen Zeiträume des Mesozoikums (Saurierzeit) und des älteren Tertiärs hinweg mit CO<sub>2</sub>-Gehalten der Atmosphäre von über 1000 ppm vergleichsweise paradiesische Verhältnisse zur Gewinnung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre vorfanden, mussten sie in den Kaltphasen der Eiszeit mit weniger als 200 ppm auskommen. Selbst in den Warmphasen der Zwischeneiszeiten hat in der jüngeren Erdgeschichte die maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration die Marke von 400 ppm nicht mehr überschritten, sodass das Klima der letzten Jahrhunderttausende durch alle biologische Stoffwechselaktivität bei dieser erstaunlich niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentration gesteuert werden musste.

Der – auf längerer Zeitskala, d.h. mit dem Maßstab von Jahrhundertmillionen betrachtete – gegenwärtig niedrige CO<sub>2</sub>-Gehalt gewährleistet die trotz hoher Sonnenleistung vergleichsweise erträglichen globalen Temperaturen, ermöglicht trotzdem eine noch ausreichende CO<sub>2</sub>-Versorgung der biologischen Photosynthesysteme für organisches Material. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Natur langfristig immer effizientere Mechanismen für die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Luft entwickeln muss, damit der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt allmählich weiter abgesenkt wird, um die weiter steigende Sonnenleistung zu kompensieren. Offensichtlich ist auch die Reduzierung der Meeresoberfläche und die Bindung großer Wassermassen in den polaren Gletschern mit hohem Albedoeffekt – d.h. hoher Reflexion von Sonnenstrahlung - ein langfristiger Mechanismus, den die Natur für die Klimastabilisierung bei steigender Sonnenleistung nutzt. Vielleicht ist aber der seit rund zweieinhalb Millionen Jahren das Erdklima bestimmende Zustand mit dem Wechsel von Warm- und Kaltzeiten im gegenwärtigen Eiszeitalter Ausdruck einer noch nicht hinreichend stabilisierten Wechselbeziehung zwischen dem kosmischen und abiologischen atmosphärischen Geschehen und den Stoffwechselleistungen der biologischen Komponenten des globalen Ökosystems. Immerhin steigen im Eiszeitalter gegenüber klimatisch ruhigeren Abschnitten der Erdgeschichte die Aussterbe- und Evolutionsraten der Organismen drastisch an, was sicherlich dazu beiträgt, dass sich neue – auf die veränderten globalen Verhältnisse besser angepasste Ökosysteme entstehen können.

Es scheint, dass Eiszeiten wie Evolutionsbeschleuniger gewirkt haben, die halfen, dass ein globales ökologisches Regulationsregime durch ein anderes mit Beteiligung neuer Organismenarten abgelöst werden konnte. Die Zeitskalen dieser Veränderungen liegen in der Größenordnung von Jahrtausenden.

Tatsächlich betreffen die bewusst oder unbewusst ablaufenden menschlichen Eingriffe in die natürliche Umwelt und das Aufzehren der in der Erdgeschichte akkumulierten Entropieexport-Reserven sehr unterschiedliche Zeitskalen. Die Nutzung der Energiereserven macht das sehr gut deutlich: Die Nutzung und gegebenenfalls auch die Übernutzung der Wälder bedeutet einen Angriff auf der Zeitskala von deren Wachstum, also im Bereich von Jahrhunderten. Die Nutzung von im Quartär gebildetem Torf, wie er z.B. in historischen Zeiten im Nordsee-Watt im großen Stil abgebaut

wurde, betrifft die Zeiten der quartären Torfbildung, d.h. einige Jahrtausende, die Nutzung eiszeitlicher Holz- und Torflager Jahrhunderttausende. Die Ausbeutung der tertiären Braunkohlenlagerstätten betrifft Jahrzehntmillionen, die der typischerweise im Devon, Karbon oder Perm gebildete Steinkohlen betrifft Zeitskalen von Jahrhundertmillionen.

Als Gegenstück zur Zeitskala der Aufzehrung der Ressourcen muss man die Zeitskala der Freisetzung des Kohlendioxids in die Atmosphäre betrachten. Seit dem Beginn der Industrialisierung stieg der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre von ca. 270 ppm auf fast 400 ppm an. Schwankungen des CO<sub>2</sub>-Gehaltes zwischen etwa 200 und 350 ppm sind typisch für die Wechsel zwischen Kalt- und Warmphasen im Eiszeitalter (Pleistozän), die eine Zeitspanne von etwa 100000 Jahren betreffen. Höhere Werte kennen wir erst aus der Zeit vor dem Pleistozän. Mithin betrifft die maßgeblich durch den Menschen verursachte Zunahme des atmosphärischen Kohlendioxids – wenn man diesen Wert mit den Werten der Erdgeschichte vergleicht – bereits jetzt eine geologische Zeitskala von mehr als zweieinhalb Millionen Jahren. Prognosen gehen davon aus, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt in den nächsten Jahrhunderten bis über 1000 ppm ansteigen könnte. Dann hätte die Atmosphäre einen CO<sub>2</sub>-Gehalt wie im frühen Tertiär und im Mesozoikum, d.h. auch bezüglich der Atmosphärenzusammensetzung beträfe die Nutzung der fossilen Energiequellen Zeitskalen von einigen zehn bis hundert Millionen Jahren. Es ist diese extreme Verletzung der natürlichen Zeitskalen, die unser momentanes Handeln als so sehr problematisch erscheinen lässt.

Leider sieht die Situation in der Nutzung von geologischen Lagerstätten zur Materialgewinnung nicht besser aus. Auch unsere moderne Technik ist gegenwärtig über weite Strecken ganz ohne Nachhaltigkeit organisiert. Erze zur Metallgewinnung aber auch viele andere anorganische Rohstoffe stammen überwiegend aus Lagerstätten, die ihren Ursprung noch im Paläozoikum, d.h. vor mehr als 240 Millionen Jahren haben. Die Baustoffbeschaffung erfolgt unter Nutzung teils ebenso alter Rohstoff-Vorkommen, teils aber auch jüngerer Ablagerungen wie etwa Kalk, Kreide und Sandstein aus dem Mesozoikum oder beispielsweise von Kiesen und Sanden, die im Tertiär oder im Pleistozän abgelagert wurden.

Allein schon die langen Zeiträume, die seit der Entstehung der heute ausgebeuteten Lagerstätten vergangen sind, machen deutlich, dass wir – nach menschlichen Maßstäben selbst längerfristig – nicht mit einer natürlichen Regeneration der ausgebeuteten Vorkommen rechnen dürfen. Natürliches Recycling im Sinne von Nachhaltigkeit ist beim gegenwärtigen Stil der Rohstoffnutzung bestenfalls auf der Zeitskala von Jahrhundertmillionen zu erwarten. Hinzu kommt, dass nicht nur eine lange Zeit zwischen der Entstehung der Lagerstätten und heute vergangen ist, sondern die Lagerstättenbildung selbst oft sehr lange Zeiträume in Anspruch nimmt. In manchen Fällen sind es aber auch kurzfristige katastrophale Ereignisse, die Lagerstätten erzeugt haben: Man denke dabei z.B. an die Überflutung von Auenwäldern und die Überlagerung des gestürzten und abgelagerten Holzes durch Sande infolge gigantischer Überschwemmungen oder an die Entstehung von Basaltvorkommen durch Vulkanausbrüche. Insgesamt bedeuten die langen geologischen Zeitskalen, die wir mit unserer momentan praktizierten Strategie der Rohstoffnutzung verletzen, nicht nur

lange Zeiträume, sondern schließen auch dramatische Wechsel in den Umweltbedingungen und seltene, aber doch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftretenden regionale und globalen Katastrophen ein.

## **Entropieexport in der industriellen Materialwirtschaft**

Die industrielle Nutzung der natürlichen Ressourcen für die Energieerzeugung und die Materialgewinnung ist Ausdruck des Entropieexports der Industriegesellschaft. Auch unsere Gesellschaft und unser Wirtschaftssystem unterliegen der Thermodynamik. Deshalb müssen sie offene Systeme sein, die Entropie produzieren und die in der Lage sind, mehr Entropie zu exportieren als erzeugt wird, damit Ordnungsstrukturen aufgebaut werden können.

Über weite Phasen der Entwicklung der menschlichen Kultur spielten Rohstoffe und Energieträger aus erneuerbaren Quellen die dominierende Rolle. So wurden – abgesehen von den Steingeräten – vor der Metallzeit fast ausschließlich erneuerbare Materialien – vor allem Holz und Knochen – für Werkzeuge und Gebrauchsgegenstände eingesetzt. Der Energiebedarf wurde praktisch durchweg durch Holz und andere pflanzliche Quellen gedeckt. Auch die frühen Gesellschaften benötigten diesen Verbrauch von natürlichen Ressourcen. Diese Quellen und die Gewinnung von Gestein für Werkzeuge und Waffen genügten jedoch, um den erforderlichen Entropieexport zu gewährleisten (Abb. 24). Die Ressourcennutzung betraf damit im Wesentlichen natürliche Quellen, die sich im Laufe von Jahrzehnten bis Jahrhunderten regenerieren konnten. Es lag damit keine wesentliche Verletzung natürlicher Zeitskalen vor. Die frühen menschlichen Gesellschaften schufen und nutzten ein Entropieexportsystem, das direkt an den permanenten Entropiefluss von der Erde in den Kosmos, der durch die Kombination von Sonneneinstrahlung auf die Erde und Infrarot-Abstrahlung von der Erde zustande kommt, angekoppelt war. Einzige Ausnahme war die genannte Nutzung von Gesteinen zur Werkzeugherstellung, was jedoch angesichts der Größe der Vorkommen und des Umfangs der Nutzung selbst über die langen Zeiträume der Steinzeit als unproblematisch einzustufen ist.

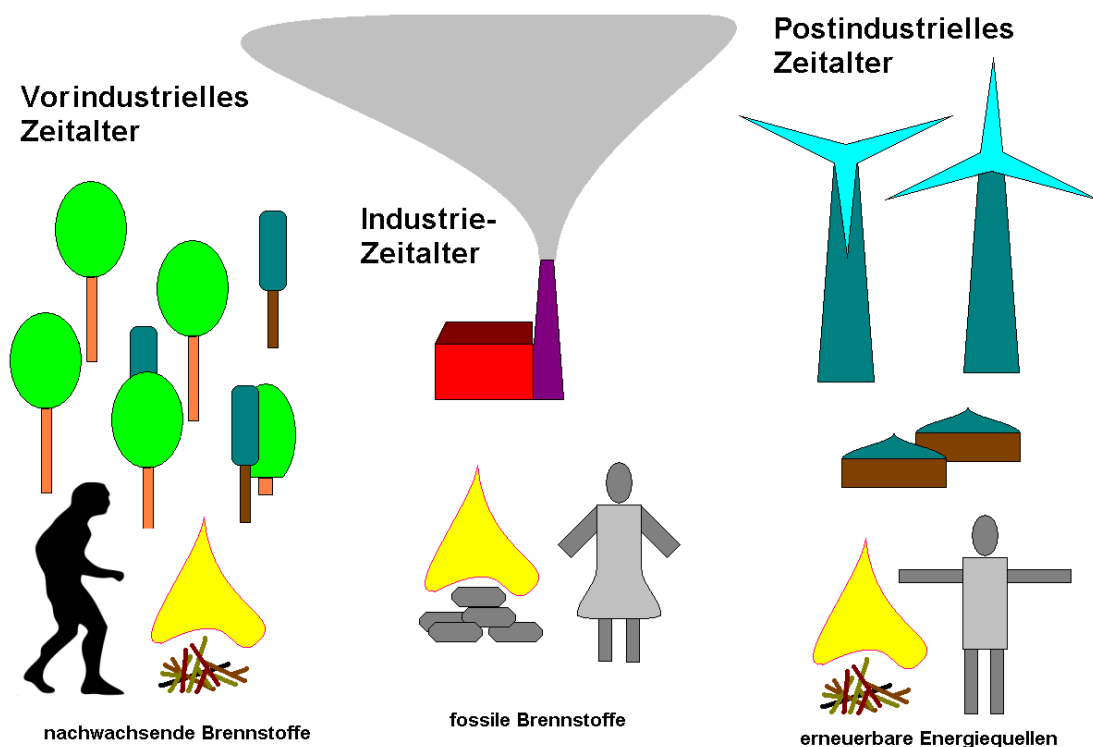


Abb. 24 Kulturelle Entwicklung des Entropieexports

Diese Situation änderte sich grundsätzlich mit dem Beginn der Metallzeit. Mit der Ausbeutung der Kupfer- und Zinn-Erze für die Bronzeherstellung wurde eine Ressource erschlossen, die vergleichsweise begrenzt vorhanden ist, aber deren Bildung wie die vieler fossiler Energieträger-Lagerstätten Jahrhundertmillionen zurückliegt. Mit der anfangs auf die an der Erdoberfläche austretenden erzführenden Schichten beschränkten Nutzung war der Eingriff des bronzezeitlichen Menschen weitgehend noch im Rahmen der natürlichen Erosions- und Verlagerungsprozesse. Je mehr aber die oberflächennahe Erzgewinnung in einen bergmännischen Abbau überging, umso stärker manifestierte sich der nicht-umkehrbare Charakter der Gewinnung und Verteilung des Materials. Schon in vorgeschichtlicher Zeit – vor allem seit der jüngeren Bronzezeit – erfolgte ein erheblicher Untertageabbau. Welches enorme Ausmaß die Erzgewinnung in der Industrialisierung gewann, machen gigantische Tagebaugruben und ein Untertageabbau deutlich, in deren Zuge z.B. über hunderte von Quadratkilometern ganze geologische Schichten komplett herausgeschnitten wurden. Ein typisches Beispiel dafür ist der Kupferschieferbergbau im Mansfelder Land in Sachsen-Anhalt. Das ursprünglich in den Lagerstätten als Erz konzentrierte und das daraus gewonnene Kupfer wurde vielfältig verarbeitet, exportiert und damit weltweit verteilt. Trotz teilweise wiederholter Benutzung in unterschiedlichen Gegenständen landet das Kupfer letztlich fein verteilt auf Abfalldeponien oder in Form der bei der Korrosion gebildeten Salze in Böden und Gewässern. Mit dem langfristigen Eintrag in die Meere vollendet sich so ein klassisches Beispiel für die Zunahme der Entropie durch die Nutzung von Lagerstätten und die Verteilung der aus den Rohstoffen erzeugten Produkte.

Die im Zuge der Metallurgie zerstörten natürlichen Speicher sind dabei nur ein Teil des Problems. Mit der Erfindung der Metallgewinnung stieg der Bedarf an Energieträgern für die Verhüttung der Erze sprunghaft an. Die Übernutzung und die in vielen Gegenden zu beobachtende komplette Zerstörung der Wälder sind vielfach auf den enormen Holz- und Holzkohlebedarf für Verhüttung und Metallverarbeitung zurückzuführen. Der rasch wachsende Bedarf an Eisen und Stahl war einer der Hauptmotoren für die Kohleförderung in der Industrialisierung. Nach wie vor wird ein erheblicher Teil der fossilen Energieträger als Kohle bzw. Koks für die Metallherstellung eingesetzt.

Neben der nicht-nachhaltigen Nutzung fossiler Energieträger, ist die gesamte heutige Nutzung mineralischer Rohstoffquellen nicht nachhaltig. Neben Kupfer- und Eisenerzen sowie gemischter Metallagerstätten sind es vor allem die Rohstoffe für die Bauwirtschaft, die in großen Mengen benötigt werden und für deren Gewinnung massiv in die Landschaft und damit die natürliche Umwelt eingegriffen wird. Schotter und Sande werden weltweit in großen Mengen benötigt. Ihre Lagerstätten erneuern sich teilweise durch die natürliche Erosion, Meeresdynamik, Gletscher und Fließgewässer nach geologischen Maßstäben relativ rasch. Trotzdem werden große Mengen von Material abgebaut, deren Lagerstätten Jahrmillionen alt sind. Als nach Material und Korngröße klassierte Lagerstätten stellen diese Vorkommen große geordnete Einheiten und damit große Entropieexportreserven dar. Sie sind das Produkt von atmosphärischen und von Oberflächenprozessen, die vor Jahrhunderttausenden oder Jahrmillionen durch die Energie der Sonne angetrieben worden waren. So gesehen, stellen auch sie Negentropie dar, die aus dem früheren Fluss der Sonnenenergie und die Degradation der energiereichen von der Sonne kommenden Photonen zu den von der Erde in den Weltall emittierten langwelligen Photonen gewonnen worden ist. Analog verhält es sich mit mineralischen Rohstoffen, die als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt werden bzw. zu Düngemitteln verarbeitet werden. So zeichnet sich heute weltweit ein Mangel an Lagerstätten von Phosphat ab, das sowohl in der Industrie wie in der Landwirtschaft benötigt wird.

Geologische Lagerstätten gleich welcher Art bilden stets solche „Negentropie-Speicher“, die in vergangenen Zeiten gebildet wurden. Sie sind stets Ausdruck des irdischen Entropieexports ins Weltall und damit zugleich ein Ergebnis der Fähigkeit der Erde, durch den globalen Energiefluss Strukturen und damit Ordnung aufzubauen. Jede Lagerstätte ist ein Beispiel der spontanen Bildung solcher Strukturen. Jeder natürliche Vorgang der Konzentration oder der kompletten Separation von Materialien, jede Klassierung nach Korngrößen ist ein ordnungsbildender Prozess, der die Ankopplung an einen irdischen oder kosmischen Entropieexport-Mechanismus voraussetzt. Damit sind alle geologischen Strukturen – d.h. auch solche, die heute nicht für die Rohstoffgewinnung in Betracht gezogen werden – zu den „Negentropie-Speichern“ zu rechnen.

Der Entropieexportbedarf der jungen industriellen Kultur überstieg sehr rasch die Kapazität an nachhaltigem Entropieexport, die den Menschen im natürlichen irdischen Geschehen zugänglich war. Die Ergänzung der Energiegewinnung aus Holz durch Kohle und schließlich die weitgehende Ablösung nachwachsender Energieträger durch fossile war eine typische Konsequenz des

gewachsenen Bedarfs an Entropieexport-Kapazität. Mit dem Zugriff auf die geologischen Lagerstätten greift der Mensch auf die von der Natur langfristig angelegten Negentropiespeicher zurück und befriedigt so seinen, die aktuellen natürlichen Möglichkeiten übersteigenden Entropieexportbedarf. Diese Umstellung von kurzfristig natürlich regenerierbaren Quellen auf geologische Quellen für Energie und Material ist in jeder Hinsicht Folge einer übersteigerten Entropie-Produktion. Die Mechanismen der industriellen Wirtschaft und Gesellschaft haben in den vergangenen beiden Jahrhunderten eine immer höhere globale Entropie-Produktion verursacht und damit eine immer schnellere Nutzung und Aufzehrung der in geologischen Zeiten entstandenen globalen Entropieexport-Reserven zur Folge gehabt.

Die Rolle des Entropieexports für den Aufbau mineralischer Ordnungsstrukturen mittels des Energieflusses von der Sonne über die Erde zum kosmischen Hintergrund wird besonders schön am Beispiel der Kalksteinlagerstätten deutlich: Viele Gebirge der Erde bestehen zu großen Teilen aus Calciumcarbonat oder Calciummagnesiumcarbonat (Dolomit) und stellen von daher typische Beispiele für ein weitgehend konzentriertes Material dar, in dem eine einzelne chemische Substanz als Hauptkomponente dominiert. In einzelnen Vorkommen von Kalkstein liegt das Calciumcarbonat sogar in recht reiner Form vor, so dass es auch direkt in industriellen Prozessen mit hohen Reinheitsanforderungen – z.B. in der Herstellung optischer Gläser - eingesetzt werden konnte. Die Ablagerung des Kalks geht praktisch immer auf eine biologische Aktivität zurück. Ozeanische Korallen-Riffs, Kalkalgen, Muscheln und andere Schalentiere haben seit Jahrhundertmillionen immer wieder große Kalksteinablagerungen aufgebaut. Diese bestehen aus den abgestorbenen Teilen von Schalen und Skeletten kalkbildender Organismen, die ihrerseits Schlussglieder einer Nahrungskette sind, an deren Anfang vor allem photosyntheseaktive aquatische Mikroorganismen stehen. Diese beziehen ihre Energie von der Sonne und wandeln diese Atmosphäre verteilten Kohlendioxids in die chemische Energie der gebildeten energiereichen organischen Stoffe und Wärme um. Die am Ende der Nahrungskette stehenden Kalkbildner profitieren damit von der Einstrahlung der Sonne und der Abgabe der Wärme, die letztlich wieder über Infrarotstrahlung an den Kosmos erfolgt. Ohne Photosynthese gäbe es keine Kalkstein- und Dolomitgebirge. Ihre Entstehung erklärt sich aus dem irdischen Entropieexportgeschehen während früherer erdgeschichtlicher Epochen: Durch Vermittlung über produktive Lebensgemeinschaften, die Sonnenlicht durch die Photosynthese zum Aufbau organischen Materials genutzt haben, wurde – gewissermaßen als Begleitprozess – biogenes mineralisches Material geordnet deponiert. Während das organische Material längst weitgehend abgebaut ist, haben die geordneten mineralischen Deponien die Jahrhundertmillionen überdauert. Sie stellen Ordnung dar, zu deren Bildung Entropie in einem nachhaltigen Prozess von der Erde in den Kosmos transportiert wurde.

Diesen ordnungsbildenden Prozess kehren wir heute gewissermaßen um, indem Kalkstein als Bau- und Rohstoff abgebaut und innerhalb diverser Nutzungen wieder über die Erde verteilt wird. Diese Verteilung mag kurzfristig auch die Entstehung von Ordnung bedeuten, insofern technische Strukturen entstehen, die die Ordnung innerhalb der menschlichen Kultur und Gesellschaft sichern,

z.B. eine gut funktionierende Verkehrsinfrastruktur gewährleisten. Langfristig – mit dem Ablauf der Lebens- oder Nutzungsdauer dieser Bauwerke – verlieren diese technischen Strukturen ihren Wert als ordnende Elemente, und schließlich bleibt nur der Verlust an geologischer Ordnung erhalten. Die Diskrepanz liegt vor allem wieder im Verhältnis der Zeitskalen: einige Jahrzehnte, in denen die menschlichen Bauwerke, die technischen Strukturen ihre Funktion erfüllen, stehen den Jahrmillionen gegenüber, in denen sich die Lagerstätten gebildet haben, die wir für diese Bauwerke vernichtet haben.

Es ist ganz typisch für die auf Wirtschaftlichkeit orientierte Industriegesellschaft, dass die am leichtesten zugänglichen, die am höchsten konzentrierten und die saubersten Lagerstätten bevorzugt und zuerst abgebaut werden. Diese Lagerstätten verkörpern das höchste chemische Potenzial, dem der Mensch gewissermaßen zur Entspannung verhilft. Im Allgemeinen sind die geologischen Quellen leichter zu erschließen, kostengünstiger zu nutzen als regenerierbare Rohstoff- und Materialquellen. Der ökonomische Druck auf die Minimierung der Kosten und die Maximierung der Umsätze und Gewinne, der generell in der Marktwirtschaft auf allen Unternehmen lastet, unterstützt diese Bevorzugung geologischer Lagerstätten. Erst die Einsicht in die Fehlerhaftigkeit dieses Mechanismus' und die bewusste Ingangsetzung alternativer Regelkreise durch politische Entscheidungen kann zu einer Überwindung von Nutzungsweisen führen, die eine massive Verletzung der Zeitskalen darstellen.

Die massive Zeitskalenverletzung, die sich aus der technischen Nutzung globaler Entropieexport-Reserven ergibt, zieht sich wie ein roter Faden durch die Technik- und Kulturgeschichte.

Der Blick in die frühe Kulturgeschichte, die sich in den Artefakten verkörpert, die die Archäologen ausgraben, illustriert eindrücklich den Unterschied zwischen den nachhaltig produzierten und genutzten und den nicht-nachhaltig produzierten Gegenständen. Während natürliche biogene Materialien auf natürliche Weise durch biologischen Abbau in ihre Bestandteile zerlegt und ihre Bestandteile in die natürlichen Stoffkreisläufe zurückgeführt werden, blieben die Gegenstände aus anorganischen, mineralischen Materialien erhalten. Deswegen finden die Archäologen zumeist keine Reste der durch frühe nachhaltige Materialwirtschaft gewonnenen Materialien: Naturfasertextilien und Gegenstände aus Holz sind zumeist längst vergangen und werden deshalb nur selten gefunden, obwohl sie intensiv hergestellt und genutzt wurden. Stein- und Metallsachen dagegen, die wahrscheinlich schon wegen ihres hohen Herstellungsaufwandes in viel kleineren Stückzahlen existierten, werden häufiger ausgegraben, weil ihre Materialien innerhalb von Jahrtausenden im Allgemeinen nicht durch natürliche Prozesse in die natürlichen Stoffkreisläufe zurückgegeben werden.

So kündeten die Steingeräte der Steinzeit nicht nur vom Beginn technischer Kultur, sondern sind zugleich Anzeiger der beginnenden nicht-nachhaltigen Rohstoffnutzung, die allerdings damals ökologisch unkritisch war. Eine neue Stufe des nicht-nachhaltigen Wirtschaftens wurde mit dem Beginn der Metallzeit eingeläutet. Der zeitskalenverletzende Charakter der Erzgewinnung und

Metallurgie besteht von den Anfängen der Metallurgie in der frühen Kupferzeit über Bronze- und frühe Eisenzeit, Antike und das Mittelalter bis heute fort. Mit der Industrialisierung wurden nur die Dimensionen dieser Zeitskalenverletzung gigantisch ausgedehnt. Und es wurden neue Rohstoffreserven für die technische Nutzung mobilisiert: Holz und Lehm, Schilf und Stroh wurden durch gebrannten Lehm, Ton-Ziegel, Kalkmörtel und schließlich Beton ersetzt. An die Stelle hölzerner Gefäße traten zunächst Ton- später Porzellan- und Glasgefäße und synthetische Polymere. Die aus Kohle und Erdöl hergestellten Polymere ersetzen auch natürliche Polymere in Textilien und Seilen und ersetzen heute teilweise Konstruktionsmaterialien im Bauwesen und im Maschinenbau. Die nicht-nachhaltige Ausbeutung der Lagerstätten, die Unfähigkeit zur Erneuerung, die Produktion, die Verteilung der Produkte und deren ökologische Konsequenzen haben globale Dimensionen angenommen.

Im Zuge der technischen Kultur wächst jedoch nicht nur das Volumen der nicht-nachhaltig gewonnenen und verwendeten Rohstoffe, sondern parallel zu den immer größeren produzierten Tonnagen, steigt auch der Anteil kleinteiliger Produkte und werden viele Produkte bis in die Mikro- und Nanometerdimensionen herab immer kleinteiliger. Immer vielgestaltiger und komplexer werden unterschiedliche Materialien zusammengefügt, um bestimmte Materialeigenschaften und Funktionen zu realisieren. Und auch hier gilt, dass die dabei entstandenen materiellen Strukturen kurzfristig wenigstens die kulturellen Ordnungsstrukturen stützen. Langfristig stellen die meisten dieser kleinteiligen Produkte jedoch auch nur Abfall dar, der aufwändig aufbereitet oder deponiert werden muss. Auch hier ist die Zeitskalenverletzung das zentrale Problem: Die Materialien für kleinteilige Geräte wie z.B. Haushaltsgeräte, Fahrzeuge, Handies und Computer stammen größtenteils aus zig-Jahrmillionenalten Lagerstätten, ihre funktionale Lebensdauer beträgt bestenfalls Jahrzehnte, oft nur wenige Jahre. Die Kleinteiligkeit des Abfalls stellt eine neue Qualität von Unordnung dar. Die Globalisierung dieser Unordnung, die ungebremste Produktion und Verteilung immer zahlreicherer und kurzlebigerer Produkte repräsentiert zwar ein Muster in neuen gesellschaftlichen Strukturen, ist mithin Bestandteil der gesellschaftlichen Ordnung, stellt aber zugleich eine immer drastischer werdende globale ökologische Unordnung her. In der Kleinteiligkeit vieler moderner Produkte spiegelt sich der ambivalente Charakter von Information und Strukturreichtum wider. Als genutzte Objekte stellen die modernen Geräte akkumulierte Information, mithin Negentropie dar. Ihre Komponenten sind in eine eindeutige räumliche Ordnung gebracht worden, um bestimmte Funktionen zu erfüllen. Die Geräte sind Bestandteil systeminhärenten Wissens. Als Abfall verlieren sie jedoch diese Funktion. Die ursprüngliche Information ist nur noch ein hohes Maß an Unordnung auf Grund der Verteilung und Kleinteiligkeit der nicht mehr gebrauchten Produkte. Aus der ehemals funktionalen Struktur ist ein Entropiezuwachs geworden.



## Kleinteiliges Produkt- und Material-Design

Vielleicht verbirgt sich jedoch im Trend zur Kleinteiligkeit von Produkten auch eine Chance, ein Ansatz, wie eine Materialwende in Angriff genommen werden kann, ohne dass damit ein Verzicht auf komplex aufgebaute und massenhaft genutzte industrielle Produkte geleistet werden muss. Die Kleinteiligkeit in industriellen Produkten hat einen janusköpfigen Charakter: Auf der einen Seite bedeutet sie den Abbau von Lagerstätten, von angereichertem Material, d.h. von Ordnung, Negentropie und die Vermischung und Verteilung der unterschiedlichen Materialien und den damit den Aufbau von Unordnung, eine Entropie-Akkumulation. Auf der anderen Seite bedeutet Kleinteiligkeit prinzipiell eine Annäherung an das biologische Vorbild lebender Systeme, denn dieses ist bezüglich der eingesetzten Komponenten und Materialien ebenfalls grundsätzlich kleinteilig organisiert.

Im Grunde besteht zwischen der Kleinteiligkeit komplexer lebender Systeme und der Kleinteiligkeit moderner industrieller Produkte eine Konvergenz im grundsätzlichen Aufbau. Es ist die Komplexität der Funktionen, die nach einem hierarchischen Aufbau verlangt. Aufbau und Funktion repräsentieren System-eigene Information, zu deren Gewinnung ein entropieproduzierender Prozess gekoppelt mit einem Entropie-Export-Mechanismus notwendig war. Strukturelle Kleinteiligkeit ist die Voraussetzung für komplexe Funktionalität. Nicht ganz zufällig sind gerade die kleinen – der Informationsgewinnung und -beschaffung dienenden – Komponenten in modernen technischen Systemen wie Sensoren und Prozessoren auch die im höchsten Grade kleinteiligen und selbst am komplexesten strukturierten Gebilde.

Kleinteiligkeit erlaubt aber in der Natur auch eine effiziente Ankopplung an die stoffliche Kreislaufwirtschaft. Kleinteiligkeit ist in der Regel mit großen Grenz- und Oberflächen verbunden. Degradations- und Abbauvorgänge, die mit Grenzflächenprozessen einhergehen, laufen im Allgemeinen schneller als an kompakten Objekten. Kleinteilige Systeme sind damit empfindlicher, stärker von den Vorgängen der Umgebung beeinflusst, aber eben auch besser reparierbar, regenerierbar oder abbaubar. Das trifft insbesondere auf poröse Materialien, schwammartige und gelartige Materialien oder porogene Materialien zu, also solche Materialien, in denen sich poröse Strukturen aus einem kompakten Zustand heraus ausbilden können. Sowohl in der lebenden Natur als auch in der Technik sind poröse und porogene Strukturen und diverse Mischformen in großer Zahl anzutreffen. Beispiele sind etwa Schwämme und Korallen, Holz und Knochen, aber auch Keramiken, Polymer-Komposite, Textilien oder verfestigte Schäume und Aerogele.

Kleinteiligkeit bedeutet aber nicht a priori „Naturähnlichkeit“. Noch weniger lässt sich daraus eine prinzipielle Umweltkompatibilität ableiten. Vom thermodynamischen Standpunkt aus betrachtet stellt Kleinteiligkeit einen Zustand erhöhter Ordnung dar, solange mit dem Muster der Kleinteiligkeit ein bestimmter Zweck, eine systemische Aufgabe erfüllt wird. Fällt diese Aufgabe weg – z. B. weil

das Lebewesen stirbt oder das Industrieprodukt nicht mehr funktioniert oder nicht mehr gebraucht wird – so ist die Kleinteiligkeit des Produktes häufig ein ernsthaftes Recycling-Hindernis.

Über die ökologische Kompatibilität entscheidet letztlich nicht die Kleinteiligkeit an sich, sondern die Verbindung des Regenerierungsprozesses der Materialien mit den natürlichen Entropieexportmechanismen. Dafür sind neben der Struktur die elementare Zusammensetzung und die Passfähigkeit der Abbau- und Transportvorgänge zu den natürlichen Prozessen wichtig, die die Komponenten an die natürlichen Kreislaufprozesse anschließen. Elemente und Verbindungen, die in den beweglichen Bereichen unserer Umwelt häufig vorkommen und in den direkt oder indirekt von der Sonne getriebenen Mechanismen häufig umgesetzt werden, also hohe natürliche „Cycling-Raten“ besitzen, sind prädestiniert für den Aufbau wie für die Regenerierung und den Abbau von Systemen, die ökokompatibel sein sollen. Elemente wie Sauerstoff, Wasserstoff und Kohlenstoff und einfache Substanzen wie die aus diesen Elementen gebildeten Verbindungen Kohlendioxid und Wasser erfüllen diese Forderung in idealer Weise. In diesem Sinne chemisch fast ebenso passfähig ist die große Palette der niedermolekularen Kohlenwasserstoffe und ihrer Derivate. Auch wenn letzter im Einzelnen oft toxisch und klimaschädlich sind, so stellen sie doch Verbindungen dar, die in ihrer Entstehung und ihrer Degradation das Kriterium der guten Ankopplung an natürliche Vorgänge erfüllen. Ja, es ist gerade diese gute Ankopplung, die für ihre zum Teil negative biologische Wirkung verantwortlich ist. Aus Sicht des Vorkommens der Elemente und ihrer einfachen – energiearmen Verbindungen – in den Gewässern und der Atmosphäre stellen diese Elemente ideale Bausteine dar. Nur wegen des geringeren erforderlichen Energieaufwandes bzw. des möglichen Energiegewinns und der niedrigeren Kosten nutzen wir häufig in der Industrie anstelle der erneuerbaren Quellen für Kohlenstoffverbindungen die alten Lagerstätten von Kohle, Öl und Gas. Ansonsten setzt die Dominanz der Elemente Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasserstoff in lebenden Systemen nicht nur deren passende chemische Eigenschaften voraus, sondern eben auch deren universelle Verfügbarkeit und ihre natürliche – Sonnenenergie-getriebene - Prozessierung in globalen Stoffkreisläufen.

Dagegen ist der Einbau selten vorkommender und nur in sehr geringem Maße natürlich umgesetzter Elemente und Verbindungen zwangsläufig mit höheren Zykluszeiten und einer weniger effizienten Wiederherstellung ursprünglicher natürlicher Verhältnisse verbunden. Mit Schwermetallen wie Kupfer, Cadmium, Quecksilber und Blei, aber auch weniger giftigen, aber seltenen Metallen wie denen aus der Platingruppe – etwa Palladium, Rhodium und Ruthenium – lassen sich viel schwerer Ankopplungen an natürliche Stoffkreisläufe realisieren. Der Gewinnung aus den Lagerstätten, in denen solche Elemente zwar im Allgemeinen nicht rein, aber doch gegenüber ihrem durchschnittlichen Vorkommen in der Erdkruste um etliche Größenordnungen angereichert vorkommen, steht am Ende die Verteilung in elementarer oder molekularer Form – im günstigsten Falle als Partikel - in Böden und Gewässern, d.h. letztlich in den Ozeanen gegenüber.

Auch die lebende Natur verzichtet in ihren Zellen nicht auf den Gebrauch selten vorkommender Elemente. Ein Grund für ihren natürlichen Gebrauch sind die besonderen chemischen, vor allem die

katalytischen Eigenschaften von einzelnen Schwermetallen. Die lebende Natur macht von diesen Metallen jedoch nur einen äußerst sparsamen Gebrauch. Anders als in chemischen Industrieanlagen, in denen anorganische Katalysatoren in der Regel in nennenswerten Lösungskonzentrationen, als kompaktes Material in Blechen und Netzen oder in massiven Schüttungen eingesetzt werden, bestehen auch die Metall-haltigen Biokatalysatoren im Wesentlichen aus Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffatomen. Tausende dieser auch in der Umgebung häufig vorkommenden Atome sind dabei zumeist um einziges Metallion herum gruppiert. Diese Gruppierung erfolgt jedoch so, dass sie die effiziente katalytische Wirkung des einen Metallions bestmöglich unterstützt und so für einen hocheffizienten Einsatz des seltener vorkommenden Elements sorgt. Den größten Aufwand treibt die lebende Zelle im Aufbau der Umgebung des katalytisch so wichtigen Metallions und verhilft diesem als Zentralteilchen in einem Metalloenzym zu einer ganz besonderen chemischen Effizienz. So lässt sich generell in der elementaren Zusammensetzung lebender Systeme ein Trend zur Anpassung der mengenmäßigen Verhältnisse der Elemente innerhalb der Systeme zu ihren mengenmäßigen Verhältnissen und ihrer Verfügbarkeit in der Umgebung feststellen [35].

Auch in der Technikgeschichte lässt sich zuweilen ein Trend zu angepassten Verhältnissen zwischen Verfügbarkeit und Nutzung ausmachen. Schöne Beispiele sind dafür etwa die frühe Ablösung der zunächst aus Kupfer und Bronze hergestellten Metallwerkzeuge und Waffen durch solche aus Eisen und Stahl oder die der Nutzung des Germaniums nachfolgende viel breitere Nutzung von Silizium in der Halbleitertechnik. In beiden Fällen kamen der Menschheit jedoch die funktionellen Vorteile des jeweils neuer genutzten Materials – Eisen und Silizium – entgegen. Die beiden gehören nicht nur zu den häufigsten Elementen der Erdkruste, sondern bieten einfach auch die besseren Eigenschaften für den massenhaften Einsatz.

Durchschnittliche Halbleiterbauelemente wie solche auf Basis von Silizium sind viel kleinteiliger als durchschnittliche Stahlwerkzeuge oder Gerätekomponenten. Doch noch weitaus kleinteiliger als das als Substrat- und Funktionsmaterial eingesetzte Silizium sind die Dünnschichtfunktionsmaterialien – unter diesen neben Siliziumdioxid und –nitrid auch Mikrostrukturen aus selten vorkommenden Elementen wie z.B. Gold als Leitbahnmaterial oder Verbindungshalbleitern. Mit der fortschreitenden Abwärtsskalierung der Bauelemente in der Halbleitertechnik setzt sich seit Jahrzehnten der Trend zur Verminderung der Abmessungen bei gleichzeitiger Zunahme der Integrationsdichte fort, d.h. neben der Strukturverkleinerung läuft Schritt für Schritt eine Zunahme der Komplexität ab, die zu immer stärker ausgeprägter Kleinteiligkeit führt. Am Ende könnten hier Bauelemente auf Basis von Molekülen und Clustern stehen, so dass wie in der lebenden Natur die Kleinteiligkeit schließlich auch bei diesen technischen Systemen bis auf das Niveau der atomaren Bausteine herunterreicht.

Nebenbei bemerkt ist die Konvergenz zwischen der Entwicklung von Strukturiertheit und Kleinteiligkeit technischer und natürlicher Systeme auch in den technologischen Prinzipien des Systemaufbaus feststellbar. Während in der traditionellen Technik komplexe Systeme durch

Montage von Funktionseinheiten aufgebaut werden, die ihrerseits aus funktionellen Untereinheiten bestehen, entstehen in der Halbleitertechnik gleichzeitig mit dem System – dem integrierten Schaltkreis – erst die Transistoren, Kondensatoren und anderen elementaren elektronischen Funktionseinheiten. Das bedeutet, dass Komponenten und System nicht nacheinander, sondern zeitlich parallel entstehen. Dieses technologische Prinzip findet sein natürliches Gegenstück in der Entwicklung eines komplexen Organismus‘ aus einem einfachen und kleinen Anfangszustand, dem Keim, unter gleichzeitigem Aufbau der Komponenten – Gewebe und Organe – sowie dem System als Ganzem.

## **Nachhaltigkeit und Zeitskalenanpassung**

Kleinteiligkeit bedeutet nicht automatisch eine rasche Ankopplung an natürliche Stoffkreisläufe. Selbst das globale Ökosystem liefert uns Beispiele für sehr langfristig arbeitende Stoffkreisläufe. Immer, wenn die geologische Bewegung der Plattentektonik der langsamste Schritt in einem Stoffkreislauf ist, rücken die Zeitskalen in die Dimension von Jahrhundertmillionen. Das ist genau in jenen Kreisläufen der Fall, in denen Sedimentschichten aufgebaut werden, aus denen erst durch den lateralen Transport der Platten und eine nachfolgende Subduktion in den Erdmantel Materialien massiv thermisch beansprucht und in flüchtige Produkte umgewandelt werden. Das klassische Beispiel dafür bildet die natürliche Freisetzung von Kohlenstoff aus Sedimenten in Form von Kohlendioxid bei der thermischen Zersetzung von Carbonatgesteinen, wenn diese in hinreichend tiefe und heiße Zonen des Erdmantels heruntergedrückt werden. Zwangsläufig entsprechen die Zeitspannen zwischen biogener Bildung und Sedimentation der Carbonate und der endogenen thermischen Zersetzung der Schichten den Zeiträumen der Bewegung der Kontinente, der Entstehung und dem Verschwinden von Ozeanen. Wegen ihrer Kopplung an die Dynamik der geologischen Prozesse liegt jedoch auch die Größenordnung der natürlichen Lebensdauern von Erz- und Salzlagerstätten im gleichen Bereich.

Der Begriff der nachhaltigen Rohstoffwirtschaft ist deswegen auch auf die unmittelbar mit dem biologischen Wachstum und dem kurzfristigen Transport von Stoffen durch den Kreislauf des Wassers und die atmosphärischen Transportkreisläufe fokussiert. Alle drei Kreisläufe werden permanent durch die Sonneneinstrahlung angetrieben, d.h. sie sind direkt mit dem globalen Entropieexportmechanismus verknüpft. Eine Entnahme von Material aus diesen Kreisläufen und die Rückführung von nicht mehr benötigtem Material, d.h. Abfall, in diese Kreisläufe bedeutet eine Anpassung an deren natürliche Zeitskalen. In diesem Sachverhalt liegt das zentrale Argument für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe.

Vor diesem Hintergrund fällt es zunächst leicht, gedanklich all jene Materialien zu identifizieren, die nicht aus nachwachsenden Rohstoffen zu gewinnen sind: Neben Eisen, Kupfer und allen anderen Werkstoffmetallen betrifft das auch durchweg die mineralischen Baustoffe und die synthetischen

Polymere. Angesichts des breiten und an vielen Stellen heute völlig unverzichtbaren Einsatzes dieser Materialien ist es viel weniger leicht, sich eine vollständige oder auch nur eine gewisse Substitution durch nachwachsende Rohstoffe vorzustellen. Um diese Aufgabe zu bewältigen müssen drei Gruppen von Problemen gelöst werden: Zum ersten muss für die Funktionen der einzelnen Materialien in der heutigen industriellen Technik und der Alltagskultur ein Ersatz auf Basis nachhaltig erzeugbarer Rohstoffe gefunden werden. Zum Zweiten müssen nachhaltig arbeitende Verfahren entwickelt werden, mit denen diese Substitute aus den nachhaltig erzeugbaren Rohstoffen in ausreichenden Mengen hergestellt werden können. Und zum Dritten müssen die Materialien nach Erfüllung ihrer Funktion und Nutzung so konvertiert werden, dass sie wieder ohne Verlust den natürlichen Stoffkreisläufen zugeführt werden.

Die gesamte Materialwirtschaft wird in den kommenden Jahrzehnten von ihrer gegenwärtig weitgehend nicht-nachhaltigen Wirtschaftsweise in eine nachhaltige überführt werden müssen. Der Umgang mit der in der Materialwirtschaft benötigt Energie und der entropische Aspekt von Materialnutzung und Stoffwandlung werden dabei eine zentrale Rolle spielen. Die „Entropie-Wende“ wird nur durch die Verbindung der „Energie-Wende“ mit einer „Material-Wende“ zu bewältigen sein.

## **Nachhaltiger Entropie-Export in der Landwirtschaft**

Die Landwirtschaft hat wegen ihrer zentralen Funktion für die menschliche Ernährung seit ihrer Einführung eine fundamentale wirtschaftliche und politische Bedeutung gehabt. Dabei hat neben der Nahrungsmittelproduktion auch stets die Bereitstellung von pflanzlichem Material für unterschiedlichste Zwecke eine Rolle gespielt. Das schließt bis heute landwirtschaftliche Produkte für die Energiegewinnung, für Textilien, Baustoffe und viele andere Dinge ein. Landwirtschaft hat im Prinzip auch von ihren Anfängen an eine große ökologische Rolle gespielt. Aber erst während der letzten Jahrzehnte ist deutlich geworden, dass diese ökologische Bedeutung nicht nur lokal wirkt, sondern auch starke globale Auswirkungen hat.

Ackerbau, Weide- und Forstwirtschaft folgen zusammen dem Grundprinzip der Produktion unter Nutzung der pflanzlichen Photosynthese. Vom thermodynamischen Standpunkt aus wird das Potenzial aus dem photonischen Entropiegefälle zwischen der sichtbaren Sonnenstrahlung und der Wärmestrahlung der Erde genutzt, um aus energiearmen Ausgangsstoffen – vor allem Kohlendioxid und Wasser – energiereiche Stoffe zu erzeugen, die als Nahrungs- oder Genussmittel, Futtermittel, Wirkstoffe, Energieträger, Baustoffe und andere Materialien nutzbar sind. In der thermodynamischen Betrachtung dieses Vorgangs wird die Leistung der grünen Pflanzen oft auf die Energiewandlung und den daran gekoppelten Entropieexport verkürzt. Die Photosynthese erfüllt aber noch eine zweite Funktion: Sie akkumuliert verteilte Stoffe und generiert kurzfristig verfügbare Stoffreserven und langfristig lagerfähige Ressourcen. Damit haben auch Land- und Forstwirtschaft

eine Doppelfunktion: Sie stellen Stoffe und damit Energieträger bereit und sie reduzieren die durch Verteilung von Stoffen gekennzeichnete globale Entropie durch eine Fixierung und Konversion mobiler kleiner Moleküle und eine Konzentration der gebildeten Substanzen. So sind Land- und Forstwirtschaft ein globales Schlüsselinstrument zur langfristigen Absenkung des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehaltes. Die Nutzung signifikanter Anteile der Erdoberfläche für die Photosynthesegetriebene Akkumulation ist daneben aber auch geeignet, um andere verteilte Komponenten zu fixieren und zu lagern und damit deren Anteil an der globalen Entropie abzusinken und sie ggf. für eine technische Nutzung bereitzustellen, etwa verteilte Metalle, organische Umweltschadstoffe und Nanopartikel, die in verteilter Form oft Umweltgifte darstellen, aber in akkumulierter Form Rohstoffquellen sind.

Die Kopplung an die Einstrahlung des Sonnenlichtes macht die Land- und Forstwirtschaft zum einen zu einer prinzipiell nachhaltigen Basiswirtschaft, zum anderen bedeutet sie auch die zwangsläufige Kopplung an Flächen. In keinem anderen Wirtschaftszweig besitzt die Flächennutzung eine derart zentrale Bedeutung wie in der Land- und Forstwirtschaft. Ja, man kann sagen, dass die effektive Nutzung von signifikanten Teilen der Erdoberfläche zum Zwecke der Produktion durch Nutzung des Sonnenlichtes unter gleichzeitigem Abbau der durch die Stoffverteilung bedingten globalen Entropie das zentrale Merkmal von Land- und Forstwirtschaft ist. In dieser Verbindung drückt sich die Sonderstellung von Land- und Forstwirtschaft aus. Zukünftige Fabriken, die etwa Brenn- und Treibstoff aus atmosphärischem Kohlendioxid erzeugen, benötigen eine externe Energieversorgung. Photovoltaik-Felder und Solarthermiekraftwerke, die Energie durch flächenhafte Akkumulation und Umwandlung von Sonnenenergie bereitstellen, leisten selbst keinen Beitrag zur Stoff-Fixierung. Die Verbindung von flächiger Sonnenenergienutzung und Stoffwandlung gelingt im großwirtschaftlichen Maßstab bisher nur in der Landwirtschaft. Damit rücken Land- und Forstwirtschaft in eine zentrale Position für die Realisierung der „Entropie-Wende“.

Neben dem Aspekt der direkten Verknüpfung von Stoffwandlung und Sonnenenergie-Nutzung besitzen Land- und Forstwirtschaft einen weiteren fundamentalen Vorteil gegenüber industriellen Beiträgen zur Entropiewende: Die eingesetzten Systeme, d.h. die grüne Pflanze und ihr ökologisches Umfeld – Tiere und Mikroorganismen – sind ökologisch gekoppelt und damit in die natürlichen Stoffkreisläufe integriert und mit dem natürlichen Fluss der biologischen Information verbunden. Damit besitzt diese Art der Produktion zum einen a priori eine hohe Bio- und Ökocompatibilität, zum anderen kann sie sich das gesamte adaptive und evolutive Potenzial biologischer Systeme einschließlich der daraus abgeleiteten modernen biotechnischen Verfahren zu Nutze machen. Diese fundamentalen Merkmale der biologisch geprägten Flächennutzung werden aller Voraussicht nach zu einem Schlüssel in der Bewältigung der Entropie-Wende. Eine zukünftige Gesamtwirtschaft, die auf einem durchgehend nachhaltigen Entropie-Management beruht, muss deshalb in wesentlichen Zügen durch die Bewirtschaftung der Erdoberfläche, d.h. maßgeblich durch die Land- und Forstwirtschaft getragen werden.

## **Teil IV: Entropie-Export und „Werkstoff-Wende“**

### **Die Rolle der Landwirtschaft in der „Werkstoff-Wende“**

Die heutige globale Materialwirtschaft wird stark von der Nutzung von geologischen Lagerstätten und dem Einsatz mineralischer Materialien geprägt. Das ist eine direkte Folge der Industrialisierung. In deren Zuge wurde in den vergangenen Jahrhunderten das überwiegend aus biogener Synthese stammende organische Material durch leistungsfähige und oft schneller und kostengünstiger herzustellende Materialien ersetzt. Vor allem wurden aber Instrumente und Maschinen geschaffen, die nur auf Basis mineralischer Rohstoffe hergestellt werden konnten, wie z.B. durch den Einsatz von Metallen. Dies hatte zwangsläufig den bis heute charakteristischen überwiegend nicht-nachhaltigen Charakter der industriellen Materialwirtschaft zur Folge. Die Nicht-Nachhaltigkeit betrifft jedoch nicht nur Metalle, sondern auch oxidische und salzartige mineralische Rohstoffe, die in großem Umfang z.B. in der Bauwirtschaft eingesetzt werden und synthetische organische Materialien wie z. B. Kunststoffe.

Im Zuge der „Materialwende“ muss diese Situation grundlegend geändert werden. Der dazu erforderlichen stärkeren Ausrichtung der Land- und Forstwirtschaft auf die Bereitstellung von biogenen Materialien muss dazu eine radikale Konversion des Materialeinsatzes in der heutigen Technik gegenüberstehen. Die Substitution von einzelnen Metallbauteilen etwa im Fahrzeug- und Flugzeugbau durch Kunststoffelemente oder die Ergänzung der anorganischen Festkörperelektronik durch integrierte Bauelemente der organischen Halbleiterelektronik sind gewisse Schritte, jedoch bei weitem nicht der erforderliche finale Zustand. Wie groß die Herausforderungen sind, kann man an der Vorstellung messen, z.B. Automotoren, Chemiefabriken und Flugzeugturbinen aus Materialien herzustellen, die aus landwirtschaftlicher Produktion stammen. Es ist klar, dass es gerade für die auf einer relativ langen Entwicklung beruhenden, komplexen technischen Lösungen keine schnelle Konversion der eingesetzten Materialien geben wird. Sicherlich sind Brückenlösungen erforderlich, und sicherlich müssen Entwicklungs- und Erstellungszeiten von Jahrzehnten einkalkuliert werden. Aber gerade deshalb ist es erforderlich, die Entwicklungen zur vollständigen Substitution der nicht-nachhaltig hergestellten Materialien durch biogene Materialien zu intensivieren und auch auf Felder auszudehnen, in denen besonders große Herausforderungen – etwa wegen der hohen geforderten chemischen, mechanischen und thermischen Beständigkeit der Materialien – bestehen.

Lösbar sind diese Herausforderungen nur durch eine komplementäre Neuorientierung des technischen Materialeinsatzes und der Konstruktion und der industriellen Technologien auf der

einen Seite und der land- und forstwirtschaftlichen Produktion sowie den dabei eingesetzten Pflanzen und biologischen Gemeinschaften auf der anderen Seite. Das verlangt auch nach prinzipiell neuen Technologien in der Land- und Forstwirtschaft. Es ist anzunehmen, dass auch die heute noch relativ scharf gezogenen Grenzen zwischen Land- und Forstwirtschaft verschwinden werden, weil die Grundprinzipien dieser neuen Technologien auf beiden Feldern greifen müssen. Das schließt Aspekte von Mehrjährigkeit, Mischkulturen und lokal selektiver Bewirtschaftungsmaßnahmen genauso ein, wie den Einsatz von gentechnisch veränderten Kulturpflanzen aber auch gentechnisch veränderten Cokultur-Komponenten bis hin zum Design und Kultureinsatz von Kleinlebewesen und Mikroorganismengemeinschaften. Um dem neuen umfassenden Anforderungsprofil der globalen Gesamtwirtschaft mit einem vollständig nachhaltigen Entropiemanagement gerecht zu werden, wird vermutlich an die Stelle der bisherigen mehr traditionellen Land- und Forstwirtschaft eine Art „Biosolar-Wirtschaft“ treten, in der sämtliche Aktivitäten zur Biophotosynthese-gestützten Produktion, Entsorgung und Verwertung zusammengefasst sind.

## **Biosolar-Wirtschaft**

Der Begriff der „Biosolar-Wirtschaft“ umreißt das vollständig auf dem Fluss der Lichtenergie von der Sonne und der Abgabe von Wärmestrahlung beruhende globale Entropie-Management, in dem die biologische Photosynthese die zentrale Rolle spielt. Industriell-technische Verfahren der Energiekonversion sind unter diesem Begriff nur insofern einbezogen, als sie neben der Sonnen-Energiewandlung in Analogie zur biologischen Photosynthese auch eine Stoffwandlung mit der Energiewandlung verbinden, die zu einem Abbau von Entropie führt, die mit der Verteilung von Stoffen auf der Erde zu tun hat und soweit sie durch Anlagen und Methoden bewerkstelligt werden können, die in den vollständig nachhaltigen globalen Materialkreislauf einbezogen sind. Windkraft- und Photovoltaikanlagen sind demnach nur dann für die Biosolar-Wirtschaft geeignet, wenn die durch sie bereitgestellte Energie direkt oder mittelbar für die Fixierung und Deponierung von verstreuten Stoffen – wie z.B. dem atmosphärischen CO<sub>2</sub> – nutzbar ist und wenn die Anlagen vollständig aus biogenen Materialien erzeugt und nach ihrer Nutzung vollständig in biologisch nutzbare Komponenten abgebaut werden können. Insofern sind die heute bestehenden und im Aufbau befindlichen Anlagen, die der Bewältigung der Energiewende dienen, als wesentliche Komponenten von Brückentechnologien zu verstehen, die in absehbarer Zeit durch Systeme ersetzt werden müssen, die in eine vollständig nachhaltig arbeitende Gesamtwirtschaft integriert werden können.

Warum muss eine zukünftig vollständig nachhaltig arbeitende Gesamtwirtschaft auf biologischen Systemen basieren? Sind nicht auch technische Systeme denkbar, die vollständig recyclingfähig sind? Reicht es nicht, die Energiegewinnung vollständig auf den Entropieexport durch die von der Sonne zum kosmischen Hintergrund gerichtete Photonendegradation – d.h. die Konversion des sichtbaren und UV-Sonnenlichts in Infrarot-Strahlung- auszurichten?



Grundsätzlich kann diese Aufgabe auch von technischen Systemen übernommen werden. Die gegenwärtig weltweit in großem Umfang errichteten Photovoltaik- und Windkraftfelder sind aktuelle Beispiele dafür. Diese Art von Anlagen wird für viele Jahrzehnte, vielleicht für Jahrhunderte eine zentrale Rolle im Übergang zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft spielen. Trotzdem wird es aller Wahrscheinlichkeit nach nur eine Brückentechnologie sein, weil mit dem Bau Anlagen zwar die Energiegewinnung nachhaltig erfolgt, der Materialeinsatz jedoch auch mineralische, nicht-nachhaltig gewonnene Komponenten betrifft, so dass das System als Ganzes nicht zu einer komplett nachhaltigen Gesamtwirtschaft passt. Alle funktionell erforderlichen Bestandteile der Energieanlagen müssten entweder aus der biologischen Produktion kommen oder sich zu wirtschaftlichen Bedingungen aus Meerwasser gewinnen lassen. Dieser Forderung der Gewinnung aus Meerwasser liegt die Vorstellung zu Grunde, dass über längere Zeiträume weg, die meisten Bestandteile von technischen Abfällen irgendwann in korrodierter Form – die meisten Metalle als Salze oder oxydische Partikel - über die Flüsse ins Meer gelangen. Die Verteilung der Abfallbestandteile in der Umwelt und im Meer ist ein typischer durch die Erzeugung von Verteilungsentropie getriebener Vorgang. Als Spurenelement im Meerwasser weist ein Element die höchste mögliche Entropie auf. Entsprechend groß ist der Energieaufwand, der zur Wiedergewinnung der Metalle aus dem Meerwasser getrieben werden muss, um den für die Anreicherung erforderlichen Entropieexport zu realisieren.

Wollte man auf Metalle und Halbmetalle verzichten, müssten im Falle der photovoltaischen Solarzellen sowohl die Halbleiter als auch die metallhaltige Verkabelung aus organischem Material realisiert werden, das aus Rohstoffen erzeugt wird, die aus der biologischen Produktion kommen. Schwer vorstellbar ist auch, dass die Wicklungen der Elektrogenatoren der Windkraftanlagen aus organischen Leitern gefertigt werden. Nimmt man dagegen eine nachhaltige Metallgewinnung in Kauf, so müssten die in den heutigen Anlagen zentralen metallischen Komponenten sich zum Beispiel über „Metal Farming“ aus Meerwasser anreichern lassen, um das Kriterium der Nachhaltigkeit zu erfüllen. Das kann nur wirtschaftlich werden, wenn die Anlagen über sehr langen Betriebszeiten arbeiten und viele Recycling-Zyklen durchlaufen werden, bevor die Reste in den Ozeanen landen.

Die zentrale Bedeutung der biologischen Materialbereitstellung, die auf der natürlichen Photosynthese beruht, erklärt sich generell aus der Notwendigkeit eines vollständig nachhaltigen Entropieexports. Eine Wirtschaft, die ihren Materialbedarf vollständig auf der Photosynthese aufbaut, hat die besten Voraussetzungen, um sowohl die Produktion als auch Einsatz und Entsorgung direkt an die natürlichen biologischen Stoffkreisläufe anzukoppeln. Die Materialerzeugung erfolgt in vollständiger Analogie zur natürlichen Assimilation. Und im Gegenzug können die nicht mehr benötigten organischen Materialien aus den Produkten wieder biologisch abgebaut bzw. erneut in die biologischen Stoffkreisläufe eingespeist werden. Die technische Materialwirtschaft wäre damit ein integraler Bestandteil des natürlichen globalen Stoffwechselgeschehens und des natürlichen globalen Stoffaustauschs und Stoffwandels. Die

meisten Metalle – vor allem die selten vorkommenden - werden für die biologischen Abläufe nur in äußerst geringen Mengen benötigt. So existieren für die Schwermetallionen, die als Zentralteilchen in vielen Enzymen fungieren, bereits heute in den lebenden Organismen geeignete biochemische Mechanismen, um diese aus der natürlichen Umwelt zu gewinnen. Die benötigten Mengen an diesen Elementen sind jedoch so gering, dass die lebende Natur sich den energetischen Aufwand – d.h. den Entropieexport-Aufwand - für ihre Beschaffung trotz sehr niedriger Konzentrationen in der Umwelt leisten kann.

Für darüber hinaus benötigte technische Spezialelemente, die auf den Einsatz deutlicher Mengen von Metallen und Halbleitern nicht verzichten können, gestaltet sich die Organisation von Nachhaltigkeit viel komplizierter. Für ihre Herstellung und Entsorgung müssen technische Prozessketten konstruiert werden, in denen die Prozessschritte in ihrer Gesamtheit das Kriterium der Nachhaltigkeit erfüllen. Den damit verbundenen Aufwand wird man nur im äußersten Falle für Schlüsselfunktionen in Kauf nehmen. Für alle anderen Bereiche wird die Photosynthese-basierte Materialbereitstellung und eine insgesamt an die biologischen Stoffkreisläufe angekoppelte Produktion und Entsorgung die dominierende Rolle spielen. Deren Energiegewinnung wird, wie bereits heute in der Land- und Forstwirtschaft, die flächenbezogene Bioproduktion sein, die durch Sonnenlicht getrieben wird. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, die sogenannte „Agroforst-Wirtschaft“ und eine – im Unterschied zu vertikal aufgebauten und künstlich beleuchteten Aquakulturen - ausgedehnte Flächen-nutzende und Sonnenenergie-basierte „Aquakultur-Wirtschaft“ werden die tragenden Säulen einer solchen Biosolarwirtschaft werden, die nicht nur für die Nahrungs- und Futtermittelerzeugung, sondern auch für jegliche Produktion von Material und Energie die Grundlage darstellt. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, die sogenannte „Agroforst-Wirtschaft“ und eine flächige Sonnenenergie-basierte „Aquakultur-Wirtschaft“ werden hier gemeinsam als „Biosolare Flächenwirtschaft“ bezeichnet. Das wesentliche gemeinsame Charakteristikum dieser Wirtschaftsbereiche ist die Pflege des globalen Lebensraumes mit dem Ziel einer effizienten und vollständig nachhaltigen Konversion von Sonnenenergie in unterschiedlich nutzbare Biomasse. Die Biosolare Flächenwirtschaft verbindet die Nutzung großer Teile der Erdoberfläche zur nachhaltigen Bereitstellung von Werkstoffen und Energie mit dem vollständigen Recycling der Neben- und Endprodukte und der Erhaltung einer vitalen und robusten Biosphäre.

## **Bioagartechnische Konversion und Reduktion in der Werkstoffwende**

Während die Umstellung der industriellen Energieproduktion auf nachhaltige Verfahren im Gange ist, spielt die nachhaltige Materialwirtschaft in der industriellen Produktion nach wie vor eine Nebenrolle. Trotz Recycling und Kreislaufwirtschaft basiert die industrielle Produktion im Wesentlichen auf nicht-nachhaltigen Materialien. Deswegen muss in absehbarer Zeit der Energiewende eine Material- und Werkstoffwende folgen. Nicht die – prinzipiell immer unvollständige – Wiederverwendung von Stoffen allein, die irgendwann als Rohstoffe aus

Lagerstätten gewonnen worden sind, ist die Lösung für eine nachhaltige Industrie. Stattdessen muss eine vollständige Ankopplung der gesamten Energie- und Stoffwirtschaft an die natürlichen Stoff- und Energiekreisläufe, die durch den natürlichen globalen Energie- und Entropiefluss getrieben werden, erreicht werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe ist die Landwirtschaft in einer Schlüsselposition, weil ihr zentrales Prinzip die Flächenbewirtschaftung ist. Es ist kaum anzunehmen, dass die oben genannten Anforderungen in der Paarung von Industrie und Landwirtschaft ausschließlich im direkten Zusammenspiel zwischen abiotischen Verfahren und Feldbau erfüllt werden können. Es erscheint selbstverständlich, dass es in vielen Fällen einer der industriellen Nutzung vorgeschaltete Konversion primärer landwirtschaftlicher Produkte auf biotechnischem Wege bedarf. Ebenso muss in vielen Fällen der industriellen Produktion und der Phase der Produktnutzung eine Konversion nachgeschaltet sein. Letztere ist im Besonderen als Analogon zu den natürlichen biologischen Reduzenten anzusehen. Und es ist naheliegend, dafür ebenfalls biotechnische Verfahren einzusetzen. Im Grunde genommen finden wir am Beispiel der Bioenergieerzeugung genau dieses Prinzip bereits verwirklicht. Die Herausforderung für Landwirtschaft und Industrie besteht darin, dieses Prinzip auf die Stoffwirtschaft auszudehnen. Die nachhaltige Gesamtwirtschaft wird im Ergebnis aus drei Hauptkomponenten bestehen: Erstens, der flächengebundenen, d.h. im Wesentlichen agrarisch organisierten Primärproduktion, Zweitens der industriellen Verarbeitung der agrarischen Primärprodukte und Drittens der – wohl überwiegend biotechnisch erfolgenden - Reduktion der industriellen Produkte zu einer Rückführungsform, die wieder vollständig durch die Flächenwirtschaft aufgenommen werden kann.

Es ist naheliegend, dass eine solche Wirtschaft sowohl eine drastische Umstellung der Rohstoffbasis der Industrie als auch eine erhebliche Umstellung der landwirtschaftlichen Produktion verlangt. Während die Umstellung im Bereich der Kunststoffindustrie und der organischen Standard- und Feinchemikalien noch recht gut vorstellbar ist, stellt die Umstellung im Bereich der heute genutzten mineralischen Rohstoffe und vor allem der Metalle eine gewaltige Herausforderung dar. Vermutlich wird auch eine sehr weit entwickelte nachhaltige Gesamtwirtschaft nicht ohne mineralische Rohstoffe und erst recht nicht ganz ohne Metalle auskommen. Aber man wird in dieser Industrie deren Einsatz auf ein minimales Maß reduziert haben. Aufgabe der flächengebundenen – d.h. im Wesentlichen agrarischen – Produktion wird es sein, dieses erforderliche Minimum genauso wie die biogenen organischen Rohstoffe bereitzustellen. Damit dieses Ziel erreicht werden kann, wird es auch eine verstärkte Ausdehnung des agrarischen Prinzips von der Land- auf die Wasserfläche geben müssen.

## **Landwirtschaft als Schlüsselinstrument für geschlossene Stoffkreisläufe**

Eine nachhaltige Gesamtwirtschaft verbraucht ausschließlich Produkte, die durch biologische Primärprozesse erzeugt wurden und deren Neben- und Endprodukte ausnahmslos wieder in die biologischen Primärprozesse eingespeist werden können. So wie sich der natürliche biologische Stoffkreislauf aus einem permanenten Materialaustausch zwischen autotrophen und heterotrophen Organismen – zwischen biologischen Produzenten, Konsumenten und Reduzenten – aufbaut, so muss die Landwirtschaft neben ihrer traditionellen Aufgabe der Nahrungsmittelversorgung den Kreislauf zwischen industrieller Konsumtion und industrieller Produktion – einschließlich der Entsorgung der Produkte – leisten. Landwirtschaft und Industrie können in einer zukünftigen nachhaltigen Gesamtwirtschaft als analoges Paar zur biologischen Komplementarität von autotrophen und heterotrophen Organismen verstanden werden. Auf Grund des flächengebundenen Produktionssystems und auf Grund des Anbaus Photosynthese-aktiver Pflanzen lässt sich die Landwirtschaft insgesamt als technisches autotrophes System verstehen, dem Industrie und Konsumtion als technisches heterotrophes System gegenüberstehen.

Um diesen Zustand zu erreichen, müssen zwei Grundvoraussetzungen erfüllt sein: Die Industrie muss ausschließlich auf nachhaltig gewinnbare Rohstoffe – d.h. überwiegend agrarisch erzeugte Produkte – zurückgreifen und ausschließlich Produkte und Nebenprodukte erzeugen, die sich wiederum in der Landwirtschaft verwerten lassen oder anderweitig in die natürlichen biologischen Stoffkreisläufe zurückgespeist werden. Im Gegenzug muss die Landwirtschaft als wesentlicher Lieferant für industrielle Rohstoffe fungieren und so strukturiert sein, dass die essentiellen industriellen Materialanforderungen nach Art und Menge befriedigt und die industriellen Produkte durch sie verwertet werden können.

### **Aqua-Agrarwirtschaft**

Aquakulturen sind nicht neu, aber häufig nicht auf die optimale Ausnutzung des Sonnenlichts ausgerichtet, sondern nutzen – im Gegenteil – eine intensive und elektroenergieaufwändige künstliche Beleuchtung. Alternative Anbautechniken und – auf den globalen Entropieexport fokussierte – Flächennutzungs-Strategien werden vermutlich im Kontext der nachhaltigen Biosolarwirtschaft einen neuen Stellenwert bekommen. Insbesondere werden sie aller Wahrscheinlichkeit nach mit agrarischen Prinzipien organisiert werden. Sie stellen damit die Ausdehnung der Methoden der Landwirtschaft auf die Wasserfläche dar.

Die Hauptmotivation für diese Erweiterung speist sich nicht nur aus dem Wunsch nach einer Vergrößerung der für die Photosynthese nutzbaren Erdoberfläche und einer Erweiterung der Nahrungsgüterproduktion. Das wird zunächst vielleicht ein mehr oder weniger wichtiger Nebeneffekt sein. Viel bedeutsamer wird wahrscheinlich eine direkt oder indirekt an die

Photosynthese gekoppelte Anreicherung von im Wasser gelösten oder dispergierten Komponenten werden. Vor allem dürfte die Anreicherung der in den Weltmeeren und anderen Gewässern verteilten Metalle durch Aquafarmen ein zentrales Instrument für die nachhaltige Bereitstellung dieser Materialien werden. Daneben können solche durch Sonnenlicht gespeisten aquatischen Anbauflächen wahrscheinlich auch für die Akkumulation von manchen Nichtmetallen, von molekularen Materialien sowie dispergierten Mikro- und Nanopartikeln ausgelegt werden. Jede Form der Anreicherung verkörpert zugleich eine Form des Anlegens von Entropieexport-Reserven, da die Überführung jeder verteilten Komponente in eine Ansammlung, jede Konzentration und Sortierung einen Abbau von Entropie bedeutet.

### **„Metal-Aqua-Farming“**

Im folgenden Abschnitt soll der Einsatz von Metallen als Beispiel für einen möglichen zukünftigen Umgang mit limitierten Rohstoffen diskutiert werden. Dabei wird ein Konzept verfolgt, bei dem die Rohstoffgewinnung eng an natürliche Stoffkreisläufe angekoppelt wird.

In einer zukünftigen nachhaltig gestalteten Industrie wird der Einsatz von Metallen mengenmäßig gegenüber der heutigen Praxis reduziert sein. Der zu erwartende geringere Einsatz von Metallen erklärt sich aus der einfachen Tatsache der schlechten Kompatibilität der allermeisten Biosysteme mit größeren Mengen der meisten Metalle oder auch höheren Konzentrationen von Metallionen. Aber eine moderne Gesellschaft wird nicht gänzlich ohne Metalle und Halbleiter auskommen. Ihre speziellen elektronenleitenden, Redox- und katalytischen Eigenschaften machen sie unverzichtbar. Aber ihr Masseneinsatz kann reduziert werden. Die lebende Natur lehrt z.B., dass die speziellen Eigenschaften von Metallen auch sehr effizient in Form von einzelnen Atomen bzw. Ionen genutzt werden können, wenn diese in eine geeignete molekulare Umgebung wie etwa bei den Metalloenzymen eingebettet sind. Während die elektronischen und katalytischen Eigenschaften von Metallen und Halbleitern und speziell auch die Abstufung ihrer elektronischen und chemischen Eigenschaften durch die Gruppen und Perioden des Periodensystems hindurch kaum durch organische Materialien zu ersetzen sind, ist für andere Funktionen und Eigenschaften der Metalle, die heute in der Technik eingesetzt werden, eine Substitution durch organisches Material oder ggf. durch gut biokompatible und in die natürlichen Stoffkreisläufe passende oxidisch-mineralische Bestandteile gut möglich. Das betrifft z.B. mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit und Elastizität, aber auch die Temperatur- und Reaktionsbeständigkeit.

Da der Erzbergbau grundsätzlich eine nicht-nachhaltige Praxis darstellt, muss er über kurz oder lang komplett eingestellt werden, wenn eine vollständige Nachhaltigkeit in der Werkstoffwirtschaft erreicht werden soll. Langfristig kommt als allgemeine Quelle für eine nachhaltige Metallgewinnung nur das Meerwasser in Frage, in dem die vom Land und in technischen Prozessen umgesetzten und

durch Korrosion und Ausspülung mobilisierten Metalle in Form von Partikeln, Verbindungen oder Ionen irgendwann wieder landen.

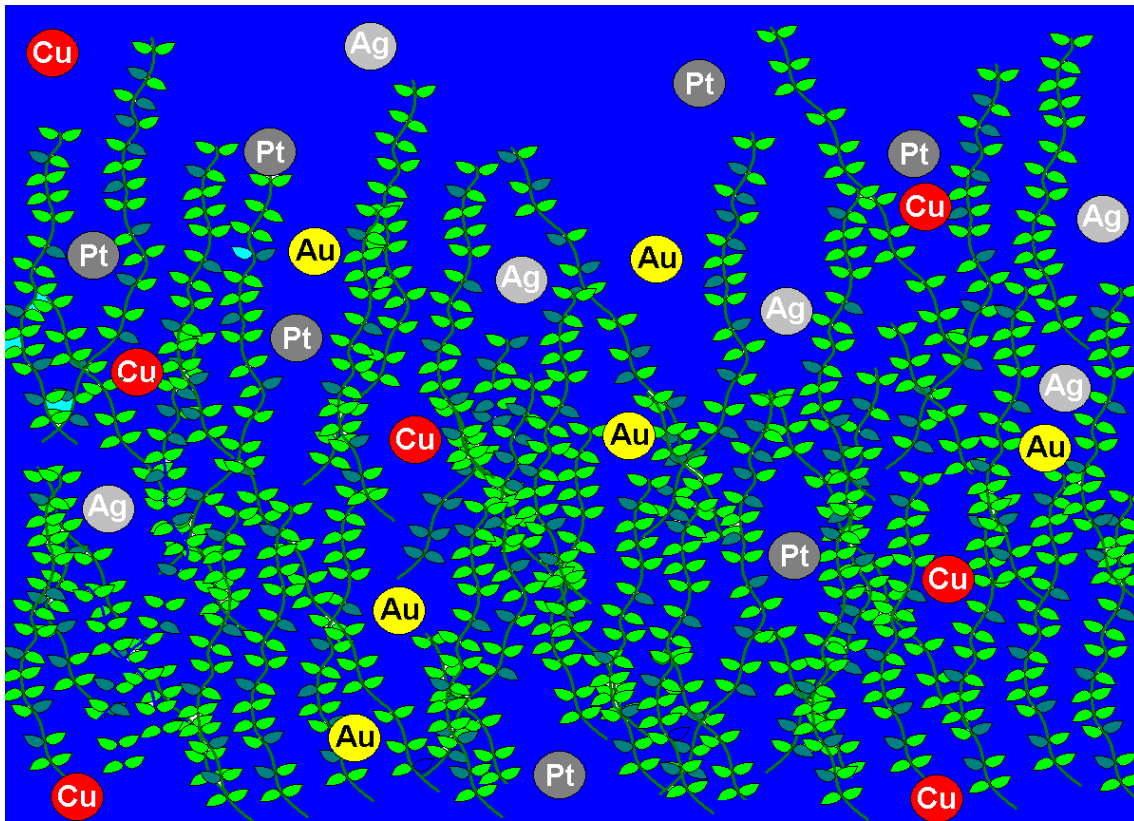


Abb. 25 Illustration des „Metal-Aqua-Farmings“; Photosynthese-getriebene Anreicherung wertvoller Metalle aus dem Meer

Im Meerwasser finden sich alle Elemente, d.h. auch alle benötigten Metalle – zum überwiegenden Teil jedoch in extrem geringen Konzentrationen. Eine industrielle Gewinnung der Metalle aus Meerwasser ist deswegen sehr energieaufwändig und deshalb heute unpraktikabel. Vorstellbar ist jedoch, die Metallgewinnung auf eine biologische Anreicherung aus Meerwasser umzustellen (Abb. 25). Bei einem solchen Verfahren werden Organismengemeinschaften benötigt, die – als Bestandteile der Biosolar-Wirtschaft - ihre Primärenergie durch die Photosynthese beziehen und die gleichzeitig Komponenten enthalten, die als Population größere Wassermengen umsetzen und dabei Metallionen spezifisch binden und anreichern. Organismen, speziell auch viele Mikroorganismen sind zu einer Anreicherung und Speicherung von Metallen befähigt, z.B. durch vielgestaltige molekulare Speichersysteme, sogenannte Siderophore. Es ist vorstellbar, Spezies und Lebensgemeinschaften zu züchten, die auf die Anreicherung einzelner Metalle oder bestimmter Gruppen spezialisiert sind. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird man durch gentechnische Eingriffe auch die Effizienz der Speicherung von Metallen, die nur in sehr kleinen Konzentrationen vorkommen, soweit verbessern können, dass ihr industrieller Bedarf perspektivisch gedeckt werden kann.

## Ökologische Einbettung

Lebende Systeme sind stets auf Energieverbrauch und Entropieexport angewiesen. Sie verlangen Dynamik und Umsatz und gehen zugrunde, wenn sie vom Strom der Stoffe und der Energie abgeschnitten werden. Nachhaltigkeit bedeutet deshalb nicht das Einfrieren von Zuständen, sondern die Erhaltung von Vitalität, Dynamik und Evolutionsfähigkeit. Das betrifft nicht nur die landwirtschaftlichen Kulturen, sondern vor allem das ökologische Umfeld, in das die landwirtschaftlichen Kulturen eingebettet werden. Zwar bedeutet Landwirtschaft a priori die Substitution natürlicher Lebensgemeinschaften durch landwirtschaftliche Kulturen und damit erzwungene Lebensgemeinschaften. Dabei bleibt jedoch jegliche landwirtschaftliche Flächennutzung Bestandteil eines Ökotops. Nachhaltige Landwirtschaft bedeutet, dass nicht der natürliche Charakter und die natürliche Zusammensetzung der lokalen Biozönose, wohl aber die grundsätzliche Vitalität, die Anpassungs-, Regenerierungs- und Evolutionsfähigkeit des Biotops erhalten oder verbessert wird.

Nachhaltige ökologische Einbettung muss deswegen keineswegs die vorgezeichnete Rückkehr in einen zu irgendeiner früheren Zeit vorhandenen Zustand mit der damaligen Lebensgemeinschaft bedeuten. Das wäre völlig unökologisch gedacht. Stattdessen bedeutet eine nachhaltige ökologische Einbettung landwirtschaftlich genutzter Flächen die Erhaltung von Produktivität, Vitalität und Entwicklungspotenzial im Rahmen eines biologisch und agrarisch produktiven und anpassungsfähigen Wechselspiels von biologischen Nutz- und Begleitkomponenten. Nachhaltige Flächennutzung bedeutet in diesem Sinne eine Anpassung der landwirtschaftlichen Nutzung an die natürlichen Komponenten eines Ökotops unter Förderung der Anpassung der natürlichen Komponenten ebendieses Ökotops an die künstlich eingeführten Komponenten und die angestrebte landwirtschaftliche Produktionsleistung.

Agrarische Flächen sind Kulturökotope. Ihre Bewirtschaftung ist genau dann nachhaltig, wenn diese Kulturökotope langfristig vital und produktiv bleiben. Dafür ist im Allgemeinen die ausschließliche Zulassung einzelner Spezies oder kleiner Gruppen nicht ausreichend. Genauso wenig sind die Kulturökotope im landwirtschaftlichen Sinne gesund, wenn sich die Zusammensetzungen der Lebensgemeinschaften völlig unkontrolliert entwickeln können. Die Einbeziehung großer Anteile der gesamten Erdoberfläche in die agrarische Bewirtschaftung dehnt das Prinzip der Kulturökotope auf den Globus als Ganzes aus. Die flächige Nutzung der Erde für eine zukünftige Nahrungsgüter- und Materialwirtschaft macht aus der Summe der lokalen Kulturökotope und der regionalen Kulturlandschaften ein globales Kulturlandschaftsmosaik, und damit aus der irdischen natürlichen Ökosphäre eine landwirtschaftlich dominierte Kultur-Ökosphäre. Um diese kulturelle Ökosphäre nachhaltig zu gestalten sind wir auf eine hohe Vielfalt von Organismen und Ökosystemen angewiesen. Nur Systeme mit hoher Diversität, d.h. einem hohen Maß von funktioneller Information, sind in der Lage sich an Umweltveränderungen anzupassen. Der Schutz von Arten, regionalen und lokalen Populationen sowie die Pflege von hochdiversen Lebensgemeinschaften ist

deswegen kein Widerspruch, sondern eine Voraussetzung für die dauerhafte flächige Nutzung unseres Planeten. Auch zu Produktionszwecken intelligent konstruierte Lebensgemeinschaften können eine hohe Diversität besitzen und wichtige Funktionen im Gesamtökosystem übernehmen.

## **Coevolutives Potenzial technisch-ökologischer Systeme**

Leben ist nicht statisch, sondern in permanenter Veränderung begriffen. Nachhaltigkeit bedeutet deshalb nicht nur Erhaltung eines einmal erreichten Zustandes, sondern muss zugleich die Fähigkeit zur Weiterentwicklung einschließen. Der Anbau bestimmter Sorten in großen und weit verbreiteten Monokulturen stellt sich diesem Prinzip entgegen. Er wurde und wird durch das Bestreben ausgelöst, eine maximale Produktion zu minimalen Kosten zu erreichen. Trotzdem ist auch diese Entwicklung der technisierten und durch Agrarchemikalien gestalteten Landwirtschaft Bestandteil eines evolutiven Prozesses. Dieser vollzieht sich jedoch vor allem auf der technischen Ebene: Maschinen, Methoden und Materialien werden weiterentwickelt, die Auseinandersetzung mit störenden Komponenten der Kulturbiozönose – z.B. Fraßschädlingen, Pilz- und Virusinfektionen – wird permanent verbessert, Sorten und Anbaumethoden werden Veränderungen klimatischer Verhältnisse angepasst. Die Fähigkeit zu dieser technischen Komponente der Weiterentwicklung entspringt aus dem technischen Fortschritt sowie den sozialen und den Marktgegebenheiten und wird deshalb stark von außerhalb der Landwirtschaft und relativ unabhängig von den lokalen ökologischen Bedingungen wirkenden Faktoren bestimmt. Dieser technisch-kulturellen Evolutionsfähigkeit steht aber die faktische Anpassungsfähigkeit des biologischen Systems neben den Kulturpflanzen gegenüber – Unkräuter, Vögel, Insekten, andere Tiere, das mineralische Substrat des Bodens und das gesamte Edaphon. Beide zusammen, die technisch bestimmte agrarische Entwicklung und das biologische System stellen immer eine faktische Einheit dar, die sich gemeinsam aneinander und an die sonstigen Bedingungen anpasst und zur Entwicklung fähig ist, d.h. ein evolutives Potenzial besitzt. Landwirtschaft bedeutet zwangsläufig immer Coevolution von kulturell-technischen und natürlichen Komponenten in einem gemeinsamen ökologischen System. Nachhaltige Landwirtschaft hat sich sowohl an der Produktivität dieses Systems als auch an dessen evolutiven Potenzial zu messen.

Ein hohes evolutives Potenzial ist im Allgemeinen an größere und diversifizierte Genpools und artenreiche Organismengemeinschaften gebunden. Auch darin liegt nur ein scheinbar fundamentaler Widerspruch zur landwirtschaftlichen Flächennutzung mit ihrer Beschränkung auf wenige und noch dazu genetisch weitgehend einheitliche Sorten. Die Beschränkung des Blicks auf die Kulturpflanzen einer bestimmten Anbaufläche selbst lässt außer Acht, dass die biologische Diversität auf bewirtschafteten Flächen auf dem mikrobiellen Niveau zum Teil größer als in natürlichen Lebensgemeinschaften ist. Beiträge zur Diversität leisten auch die natürlichen beweglichen Komponenten der lebenden Umwelt, die Lebensgemeinschaften auf den rings um eine Nutzfläche liegenden und anders bewirtschafteten Flächen und die anderen Organismen des



Bodens, die zum evolutiven Potenzial eines Areals beitragen. Nachhaltige Landwirtschaft muss diese Wechselwirkungen und die natürlichen Ressourcen der Fläche und ihrer Umgebung im Blick haben, um den ökologischen Wert und das natürliche evolutive Potenzial einer Nutzfläche im Kontext des technischen Potenzials und dessen Evolution im Sinne einer technisch-natürlichen Coevolution richtig zu beurteilen und nachhaltig zu gestalten.

Nachhaltige Landwirtschaft hat das bewährte Prinzip der hohen Produktivität durch Sortenreinheit mit Strategien zur Pflege genetischer und biozönotischer Diversität zu vereinigen. Diese Aufgabe bedeutet einerseits Änderungen der Organismengemeinschaften und der Diversität innerhalb einzelner natürlicher Populationen, andererseits die Entwicklung landwirtschaftlicher Methoden unter Einbeziehung von Co-Kultivierung. Kurzfristige landwirtschaftliche Produktivität und langfristige Erhaltung der biologischen Produktivität verlangt auch nach einer Evolution der Anbauprinzipien. Das gemeinsame Anziehen unterschiedlicher Kulturen auf kleinen Flächen bedeutet wohl in den meisten Fällen eine Verkomplizierung der Bewirtschaftung, sorgt aber für einen enormen Zugewinn an Freiheitsgraden in der Gestaltung der Bewirtschaftung.

Cokultivierung muss dabei nicht bedeuten, dass immer eine intensive Durchmischung einzelner Pflanzen vorliegt. Eine direkte Mischung einzelner Pflanzen stellt nur das unterste Niveau des Skalenmanagements in der Co-Kultivierung dar. Es repräsentiert gewissermaßen einen „Individual-dispersen Zustand“. Der Terminus der Cokultivierung passt aber zu allen Mischkulturen die auf Längenskalen auftreten, die kleiner sind als die jeweils übliche Flächenparzellierung, nach der eine Landwirtschaft organisiert ist. Bei einer Flächenbewirtschaftung von Kilometer-großen Schlägen stellt die ökologisch motivierte Mischung von Kulturen im Hektarmaßstab bereits eine Form von Co-Kultivierung dar. Ob für bestimmte landwirtschaftlich genutzte Ökotope eine Cokultivierung im Individual-dispersen Zustand, die Clusterung weniger Pflanzen oder die Untergliederung von Anbauflächen in Kultureinheiten auf der Quadratmeter-, Ar- oder Hektarskala zweckmäßig ist, muss von den Standortbedingungen, den zur Verfügung stehenden Bewirtschaftungstechniken und natürlich den Anbauzielen abhängig gemacht werden.

Einerseits ist das Prinzip der Mischkultivierung nicht neu. Es findet sehr vielgestaltig in kleinteiligen Anbaupraktiken Verwendung und ist Merkmal so ziemlich jeden Gartenbaus. Co-Kultivierung muss nicht auf zwei Arten oder Sorten beschränkt sein, sondern kann auch dutzende oder gegebenenfalls hunderte Typen betreffen, wenn es ökologische Gründe dafür gibt und geeignete Bewirtschaftungsverfahren entwickelt werden. In diesem Ansatz wird eine typische Konvergenz zwischen Landwirtschaft und Forstwirtschaft gesehen. Für letztere ist die Substitution produktiver Monokulturen durch robustere und ökologisch wertvollere - d.h. besser anpassungs- und evolutionsfähiger – Mischkulturen mitten im Gange.

Es existiert nur scheinbar ein Widerspruch zwischen der effizienten maschinellen Bearbeitung der Flächen und der Aufmerksamkeit für den Meter- und den Dezimeterbereich. Moderne Mess- und Steuerverfahren erlauben es heute schon, theoretisch jede einzelne Pflanze einer Nutzfläche zu

erfassen und ggf. individuell zu behandeln. Eine satellitengestützte Steuerung ist praktisch mit einer Präzision im unteren Zentimeter bis Millimeterbereich möglich. Damit rückt auch eine maschinelle Bearbeitung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in den Bereich des Möglichen, die bis auf die sub-Meterebene fraktioniert bestellt sind. Die Flächengliederung zwischen dem Kilometer- und dem Dezimeterbereich muss deshalb nicht an eine arbeitskräfteintensive traditionelle Bewirtschaftung oder einen noch aufwändigeren Gartenbau gebunden sein. Moderne Landwirtschaft mit digitaler Technik, Sensorik, Image-basierter Objekterfassung und Satellitenführung kann in Zukunft auch große Schläge mit komplexem Kulturaufbau automatisiert bewirtschaften.

Mit diesen Möglichkeiten erweitert sich der Spielraum nicht nur für die Flächengliederung, sondern auch für Cokultivierung und komplexe Mischkulturen im Pflanzenbau beträchtlich. Das ergibt auch völlig neue Optionen für Anbaustrategien, die in der Artenzusammensetzung natürlichen Ökosystemen nahe kommen, robuster gegen Pflanzenkrankheiten und Austrocknung und als Ökosystem insgesamt reichhaltiger gestaltet sind.

Für die zukünftige nachhaltige Landwirtschaft ist es von zentraler Bedeutung, welche Rolle Kultur Mischung und die Längenskalen von Flächenaufteilungen für die Effizienz der landwirtschaftlichen Nutzung spielen. In einem Basis-Forschungsvorhaben sollte zum einen geklärt werden, wie Optimierung der Flächenaufteilung und Kultur Mischung zur Verbindung von Diversität, Produktivität und Nachhaltigkeit beitragen können und zum anderen wie entsprechende Anbautechniken bei kleinteilig gegliederten Flächen durch computergestützte Maschinenführung – darunter z.B. Multisensorik, Bildverarbeitungsverfahren, Echtzeit-Objektidentifizierung, Einzelpflanzenerkennung und hochgenaue GPS-Führung unterstützt werden können.

## **Integration des Informationswertes ruhender Lebensformen**

Die Gesamtheit der lebenden Organismen in einem Areal und der prinzipiell verfügbaren genetischen Information stellen ein ökologisch äußerst wertvolles Negentropie-Reservoir dar. Die im Genpool der lokalen Organismengemeinschaft gespeicherte Information wurde durch den biologischen Entropieexport während der vorangegangenen Entwicklung der Lebensgemeinschaft akkumuliert. Sie sind Produkt wechselnder Umweltbedingungen und wechselnder interorganismischer Wechselbeziehungen. Aus ihrem Informationspotenzial kann die Lebensgemeinschaft eines Standortes z.B. bei Wechsel der Umgebungsbedingungen profitieren. Zu diesem Informationsschatz tragen nicht nur die vegetativen – d.h. die gerade physiologisch aktiven – Organismen, sondern auch ruhende Lebensformen bei.

Auch Anbausysteme mit wenigen Spezies und Sorten können noch ökologisch wertvoll sein, wenn es zu den Standortbedingungen passt. Die Erdoberfläche ist reich an artenarmen Biozönosen. Die Ausdehnung einer produktiven Landwirtschaft auf die großen existierenden Flächen mit Niederschlagsdefizit, schlechter Bodenbildung, speziellen nährstoffarmen Bodenbedingungen und

schwierigen klimatischen Verhältnissen ist eine Aufgabe, die nicht nur im Sinne der maßgeblich agrarisch getriebenen nachhaltigen Gesamtwirtschaft ist, sondern die auch die Ökosphäre insgesamt reicher, produktiver, ökologisch diverser, besser evolutionsfähig und robuster macht. Auch die gegenwärtig bereits unternommenen Anstrengungen einer „Wüsten-Landwirtschaft“ müssen an den Kriterien der Nachhaltigkeit und der biologischen Produktivität – d.h. vor allem ihrem Vermögen zur Bodenbildung und zur Wasserspeicherung sowie an der Effizienz Sonnenenergie in Biomasse zu konvertieren – gemessen werden.

Viele zu einem bestimmten Zeitpunkt artenarm erscheinende Standorte mit natürlichen Lebensgemeinschaften sind tatsächlich durch eine kleine Zahl vegetativer Formen bestimmt. Sie weisen jedoch häufig eine hohe Zahl und Diversität in den ruhen – „dormanten“ – Lebensformen auf. Das schließt z.B. langlebige Samen, aber auch Pilz- und Bakteriensporen und andere Ruheformen ein. In der Fähigkeit der Ausbildung eines breiten Potenzials vegetativer Formen, die unter bestimmten und zum Teil nur sporadisch oder selten auftretenden Umweltbedingungen aus den ruhenden Formen gebildet werden, ist auch ein Ergebnis evolutiver Anpassung. Dieses Prinzip findet bisher in der Landwirtschaft kaum Anwendung, könnte aber ein wichtiges Instrument zur Erschließung der weniger produktiven Bereiche der Landoberfläche für die Nutzung in der biosolaren Flächenbewirtschaftung werden. Das Prinzip der skalendiversifizierten Co-Kultivierung würde bei einer solchen Bewirtschaftung unter Nutzung von Ruheformen in einer hierarchischen – den jeweiligen lokalen Gegebenheiten angepassten – Flächengliederung in der Verteilung von unterschiedlichen vegetativen und dormanten Lebensformen realisiert werden.

## **Agrarische Mosaiklandschaft und langfristiger Schutz- und Nutz-Wechsel**

Das Management von Zeitskalen wird für eine vollständig nachhaltige Weltwirtschaft von zentraler Bedeutung sein. Dieses Zeitskalen-Management betrifft dabei nicht nur das Entropiemanagement, das die Stoff- und Energiewirtschaft umfasst, sondern auch das Management der Erdoberfläche und der Flächennutzung. Auch hier müssen Wechsel zugelassen und befördert werden, um die für die langfristige Lebensfähigkeit erforderliche Flexibilität zu gewährleisten. Die gegenwärtig dominierende permanent geregelte Einteilung der Landoberfläche von Staaten in geschützte und für die Nutzung und Vernutzung freigegebene Areale steht dieser Notwendigkeit entgegen.

Das Landschaftsbild, das die zukünftige Agrarwirtschaft hervorbringt, wird von den drei Elementen (1) Hierarchische Flächengliederung, (2) Standortangepasste ökologische Einbettung und (3) skalendiversifizierte Co-Kultivierung geprägt werden. Für die Landschaft bedeutet das eine Neuauflage des Mosaikprinzips, das sich bereits in vielen historischen und prähistorischen Kulturen bewährt hat. Die Ausführung der einzelnen Mosaiksteine und die Gestaltung des Gesamtbildes werden jedoch nicht mehr allein durch die lokalen wirtschaftlichen Erfordernisse bestimmt, sondern

tragen darüber hinaus auch den Anforderungen an die langfristige Sicherung der nachhaltigen regionalen Flächenbewirtschaftung und der nachhaltigen globalen Gesamtwirtschaft Rechnung.

Die Flächenelemente unterscheiden sich nach dem Grad der Intensität der technischen Bewirtschaftung, der Diversität der Lebensgemeinschaften, dem zugelassenen Grad der Spontaneität der Populations-Entwicklung, den Anbaubedingungen, Fruchtfolgen, der ökologischen Funktion für die Umgebung und für das regionale ökologische Potenzial sowie für die Ökosphäre insgesamt. Ausschlaggebend für Nachhaltigkeit und langfristige wirtschaftliche Nutzbarkeit sind die Robustheit und die Anpassungsfähigkeit der Gesamtmosaikstruktur. Einzelne Flächenelemente müssen im einen Extremfall dabei durchaus den Charakter von Naturschutzgebieten und Totalreservaten haben. Im anderen Extremfall sind Monokulturflächen nicht ausgeschlossen. Dazwischen gibt es Flächenelemente mit einem unterschiedlichen Grad von Kulturmischung, von intensiver Bewirtschaftung unbeacketer Flächen bis hin zu moderat genutzten und gestalteten Biotopen mit weitgehend spontaner Populationsentwicklung. Die einzelnen Flächen des Mosaiks unterscheiden sich also sowohl im Hinblick auf die Intensität der Nutzung als auch dem Grad der technisch-kulturellen Einflussnahme drastisch. Vitalität, Produktivität und Nachhaltigkeit werden durch das ökologische Wechselspiel in der geeigneten Zusammensetzung des Mosaiks und der möglichen Dynamik innerhalb der Teilflächen, aber auch in der Modifikation und Evolution der Mosaikstruktur selbst gewährleistet.

Das Zusammenspiel von wechselnden Umweltbedingungen und der Veränderung von Lebensgemeinschaften gehört zu den Grundelementen der ökologischen Dynamik auf der Erde. Der mit kurzfristigen Wechseln äußerer Bedingungen und den resultierenden Reaktionen eines Ökosystems durch allmähliche Anpassungsprozesse verursachte Stress fördert die genetische Diversität, macht die Lebensgemeinschaften vielgestaltiger und stabilisiert die Ökosphäre insgesamt. Deshalb ist eine dauerhafte Gliederung der Landoberfläche in ständig beackerte, hochproduktive Flächen, auf denen sich außerdem nur wenige Fruchtarten abwechseln, auf der einen Seite und Naturschutzgebiete, die sich möglichst nicht verändern sollen, auf der anderen Seite, nicht nur unnatürlich, sondern auch ökologisch unzweckmäßig.

Auch wenn es aus ökologischer Sicht zur Erhaltung von Arten und Biozönosen sinnvoll ist, Totalreservate zu erhalten, so können auch große Flächen, die ökologisch wichtig sind, wie viele Wälder zugleich der praktischen Nutzung dienen. Folglich dürfen Funktions-Wechsel zwischen Schutzgebieten und Nutzgebieten kein Tabu sein. Diese müssen jedoch so erfolgen, dass jede regionale Landschaftsstruktur mit der Summe ihrer Teilflächen einerseits produktiv bleibt und andererseits eine hohe biologische Diversität aufrechterhält. Dazu müssen solche Wechsel vor allem auf die Zeitskalen der spontanen Vorgänge in sich verändernden Ökosystemen Rücksicht nehmen. Pionierstadien, Sukzession und Reifung benötigen oft Jahrhunderte oder sogar Jahrtausende. Schutz- und Nutz-Wechsel müssen deshalb zum Teil auch auf diesen längeren Zeitskalen geplant werden. Hier zeichnet sich ab, dass die Strategien der Landwirtschaft stärker mit forstwirtschaftlichen Prinzipien verbunden werden müssen. Das betrifft sowohl das

forstwirtschaftliche Nachhaltigkeitsprinzip – dieses jedoch in der Anwendung auf das Flächenmosaik als Ganzes - als auch die Planungs-Zeiträume und die Artenmischung. Bäume und andere langlebige Umweltkomponenten sind essentielle Bestandteile vieler Ökosysteme, und das Wechselverhältnis von landwirtschaftlichen Standardkulturen und den sie begleitenden Organismen der agrarischen Ökosysteme mit Gehölzen und den zu diesen gehörenden Gemeinschaften werden eine zentrale Rolle in einer zukünftigen nachhaltig agrarisch genutzten Landschaft spielen. Dabei könnten sich z.B. parkartige Landschaftsstrukturen mit beackerten und beweideten Teilflächen als günstig erweisen, wie man sie aus historischen Kulturlandschaften kennt.

## **Mineralisches Potenzial, Boden-Nährstoff-Haushalt und Nährstoff-Akkumulation**

Die Verknüpfung der industriellen Produktion und der Entsorgung mit den natürlichen Stoff- und Energiekreisläufen muss vorzugsweise über Schnittstellen verlaufen, die zur Flächennutzung passen. Nur so kann ein nachhaltiger Entropieexport aus den technischen und kulturellen Systemen dauerhaft gewährleistet werden. Luft, Wasser und Boden sind dabei die drei zentralen verbindenden Elemente. Technische Rohstoffe, Neben- und Endprodukte müssen deshalb mit den Nährstoffen für das biologische Wachstum als Einheit betrachtet werden. In einer vollständig nachhaltigen Wirtschaft müssen alle diese Komponenten, d.h. damit auch jeder auf den agrarischen Flächen benötigte Nährstoff an die natürlichen Stoffkreisläufe angekoppelt sein. Industrielle Entropieproduktion, die sich neben dem Verbrauch von höherwertiger Energie und der Freisetzung von Wärme auch in der Dissipation der Materialien äußert, gibt in einem solchen System nur Stoffe ab, die vollständig von der lebenden Natur aufgenommen und durch natürliche – direkt oder indirekt durch die Sonneneinstrahlung getriebene – Prozesse akkumuliert, umgewandelt und in den biosphärischen Stoffkreislauf genutzt werden.

Über das CO<sub>2</sub> der Luft sowie die atmosphärische und die Bodenfeuchtigkeit sind Kohlenstoff und Wasserstoff als Grundelemente mit kurzen Wechselzeiten universell verfügbar. Stickstoffmangel kann durch geeignete Fruchtfolgen und Cokulturen, die nitrifizierende Boden- bzw. Wurzelbakterien fördern, durch Bindung von Luftstickstoff kompensiert werden, so dass auch ein Stickstoffaustausch auf kurzen Zeitskalen realisiert werden kann. Problematischer sind andere, mineralische Komponenten wie Phosphat, Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen und einige Spurenmetalle, die in manchen Böden reichlich zur Verfügung stehen, in anderen dagegen nicht und deswegen heute durch mineralische Düngung zugeführt werden.

Es gäbe drei Quellen, aus denen diese mineralischen Komponenten den Böden zugeführt werden könnten: als Staubverfrachtung über die Luft, durch natürlichen Transport über die Bewegung von Tieren oder durch Gewinnung aus sich selbst regenerierenden Quellen bzw. dem Meerwasser und anschließende übliche Applikation als Mineraldüngung.

Man kann wahrscheinlich davon ausgehen, dass in den meisten Fällen auch hier eine Mischstrategie am zweckmäßigsten ist. Die natürliche Verfrachtung von Stäuben durch die atmosphärische Zirkulation ist eine wichtige Komponente zum Eintrag von Mineralen, ist jedoch sowohl in Intensität und Richtung als auch bezüglich der benötigten Komponenten schwer steuerbar. Möglicherweise wird diese Komponente im Zuge eines zukünftigen globalen Klimamanagements eine gewisse Rolle spielen. Einen Beitrag könnte die Architektur der Flächenmosaik durch die räumliche und zeitliche Festlegung von Teilflächen leisten, die als Staubspeicher bei bestimmtem mineralischem Untergrund fungieren. Deren Mitwirkung bei der Mineralversorgung könnte sowohl lokaler und regionaler Natur sein, z.B. für die Übertragung zwischen benachbarten Flächenelementen, die auf geologisch unterschiedlichem Untergrund liegen. Ein Beispiel dafür wäre etwa die häufig benachbart anzutreffende Paarung von sauren kieselsäurereichen Sandsteinböden und basischen calcium- und Magnesiumcarbonat-reichen Kalkböden. Eine solche kontrollierte natürliche Staubbüschung könnte aber auch über größere Flächen und Entfernungen von statten gehen, z.B. durch die kontinentale und z.T. sogar transkontinentale Luftverfrachtung von Wüsten- und Steppenstaub mit hohen Eisen- und anderen Mineralanteilen. Bei der Einbeziehung von solchen Luftverfrachtungen in ein Mineralversorgungskonzept ist jedoch immer in Betracht zu ziehen, dass auch unerwünschte Komponenten – anorganische wie biologische, darunter Samen, Pilz- und Bakteriensporen mit verfrachtet werden, was nur schwer kontrolliert werden kann. Außerdem setzt die massenhafte Mobilisierung von Staub offene Flächen wie in den Wüstengebieten voraus, die ja eigentlich durch Verbesserung der lokalen biologischen Produktivität verschwinden sollen.

Die Vision des kontrollierten globalen Transports von Mineralen kann im Prinzip auch auf vulkanische Aschen ausgedehnt werden, die häufig sehr reich an Mineralen sind, die für die Düngung interessant wären. Seit tiefer Vergangenheit und bis in die Gegenwart wird diese Quelle ausschließlich passiv genutzt, indem die Umgebungen von Vulkanen häufig wichtige und hocheffiziente Anbauflächen tragen. Es ist jedoch grundsätzlich vorstellbar, dass der Mensch in Zukunft auch Instrumente entwickeln wird, um moderierend auf den Vulkanismus einzuwirken – also Zeitpunkt, Intensität und Dauer von Vulkanausbrüchen zu beeinflussen. Diese zukünftig zu erwartende Fähigkeit sollte nicht nur einer Verbesserung der Sicherheit bei Vulkanausbrüchen und Erdbeben dienen, sondern auch in den Dienst der lokalen, regionalen und globalen Verfrachtung und Flächen-Deponierung von Mineralen im Sinne der nachhaltigen landwirtschaftlichen Bewirtschaftung gestellt werden.

Näherliegend und einfacher lokal umzusetzen sind Konzepte der Verhinderung eines überhöhten Austrags von benötigten Mineralen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und die Verbesserung der natürlichen Akkumulation und der Bioverfügbarkeit. Diese Faktoren können im Prinzip durch geeignete Zusammensetzungen der Biozöten beeinflusst werden und sind deshalb ein starkes Argument für geschickte Fruchtfolgen und Mischkulturen.

Trotzdem wird – schon als logische und unvermeidliche Folge des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik - durch natürliche Erosion, Ausspülung und natürlich auch durch die

Produktentnahme stets ein Mineralverlust auftreten. Dieser kann teilweise durch Förderung der Mineralfreisetzung aus dem mineralischen Untergrund – z.B. durch gelegentliches besonders tiefes Pflügen - kompensiert werden. Diese Verfahrensweise stellt natürlich auch keine nachhaltige Lösung dar, da man mit ihr bestenfalls eine Ankopplung an die sehr großen Zeitskalen der natürlichen Bildung und des Abbaus von Gesteinen erreicht, d.h. typischerweise natürliche Regenerationsprozesse auf der Skala der Plattentektonik, d.h. von Jahrhundertmillionen benötigt. Damit bleibt als Alternative nur die direkte Düngung. Dieser Dünger muss aber durch vollständig nachhaltige Verfahren erzeugt werden, wenn die Nachhaltigkeit insgesamt gewährleistet sein soll. Das legt die Notwendigkeit nahe, dass die Flächenbewirtschaftung selbst die benötigten Mineraldünger erzeugt. Eine solche Versorgung wird partiell durch Akkumulation von bestimmten Elementen in agrarisch gewonnener Biomasse realisiert werden können. Fungieren dabei Böden mit reichlich mineralispendendem Untergrund als primäre Quelle dieser Elemente, so kann eine solche Nutzung ähnlich wie im Falle der natürlichen Windverfrachtung von Mineralen als „quasi-nachhaltig“ betrachtet werden.

Wahrscheinlich wird diese quasi-nachhaltige Mineralversorgung durch Akkumulation auf bestimmten Böden und Verbringung auf andere jedoch auch nur einen gewissen Beitrag leisten können und das Problem der Mineralversorgung nicht vollständig lösen können. Zum Beispiel wird sich auf diesem Wege wohl kaum auf Dauer eine effiziente Phosphatdüngung realisieren lassen. Wahrscheinlich wird an dieser Stelle die zukünftige Aqua-Agrarwirtschaft eine Schlüsselstellung einnehmen, indem viele für die Düngung unverzichtbaren mineralischen Komponenten, die auf anderem Wege nicht in ausreichender Menge oder passender Zusammensetzung bereitgestellt werden können, durch die Bewirtschaftung auf Meeresflächen akkumuliert und dann – ggf. nach entsprechender Verarbeitung – auf Landflächen ausgebracht werden. In diesen benötigten Technologien der Aqua-Agrarwirtschaft und der Verarbeitung ihrer Primärprodukte wird es wahrscheinlich zu einer engen technologischen Verknüpfung zwischen der Gewinnung von industriell-technischen Rohstoffen und Agrochemikalien kommen.

## **Management des evolutiven Bodenpotenzials**

In kaum einer anderen Umgebung ist das „Lernen aus den Fehlern“ so deutlich ablesbar wie im Funktionieren von Böden. Böden stellen keine Individuen oder Populationen im biologischen Sinne dar, sondern sind aus struktureller, stofflicher wie biologischer Sicht hoch uneinheitliche und hochdiverse Gebilde. Aber sie sind damit zugleich hochcharakteristische Bestandteile eines Lebensraumes und enthalten eine große Fülle an biologischer bzw. ökologischer Information. Diese Information wurde im Laufe der Bildungsprozesse eines Bodens akkumuliert. Die Entstehung der in einem Boden gespeicherten Information ist Produkt aktueller und zurückliegender Lebensvorgänge, die ihrerseits mit Entropieexport einhergingen. Sie stellen damit eine Negentropie dar, die dem Ökosystem Entwicklungsmöglichkeiten bietet und Voraussetzungen für eine effiziente Reaktion auf

Veränderungen von Umweltbedingungen und damit die Grundlage für ökologische Robustheit schafft. Der Informationspool eines Bodens erstreckt sich auf die mineralischen wie auch die biologischen Bestandteile.

Bodenstruktur und der Organismen-pool bilden im Boden ein ökologisches Gedächtnis. Die darin gespeicherte Information verkörpert demnach auch eine Entropie-Export-Reserve. Zum Reichtum dieses Gedächtnisses tragen vor allem Mikroorganismen bei, die nur in kleinen Zahlen, aber in sehr hoher Diversität zu finden sind. Die gemeinsame Existenz vegetativer, d.h. stoffwechselaktiver Organismen und einzelner Zellen und von dormanten Formen wie repräsentiert dieses Gedächtnis. Sie alle sind Produkt vorangegangener Umweltbedingungen, in denen die entsprechenden Lebewesen wachsen und sich vermehren konnten. Wechsel der Umweltbedingungen waren stets von einer mengenmäßigen Umverteilung der unterschiedlichen Typen begleitet. Durch die Ausbildung der ruhenden und Dauerformen überleben in jedem Boden aber auch Typen längere Zeiträume mit für ihr Wachstum und ihre Vermehrung ungünstigen Bedingungen. Die Komplementarität von relativ wenigen – aktiven - Typen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in großer Menge vorkommen und vielen Typen, die zum gleichen Zeitpunkt in jeweils sehr kleiner Anzahl vorkommen, aber wenig oder gar nicht aktiv sind, macht den Erfahrungsschatz eines Bodens aus, bewahrt das „Gelernte“ und bildet analog zu einem Organismus eine Art systemischen Informationssatz. Die Zerstörung dieser Information bedeutet einen Verlust an Struktur und Reaktionsvermögen und ist gleichbedeutend mit einer Zunahme von Entropie.

Das Vorkommen einer wachstumsförderlichen Mineralmischung und die Verfügbarkeit von essentiellen Elementen in den Böden ist nur ein Aspekt der Erhaltung und Pflege der Böden. Schon im anorganischen Teil des Bodens finden sich zahlreiche Eigenschaften, die für die allgemeine Fruchtbarkeit, aber auch als spezielle Voraussetzung für die Entwicklung bestimmter Pflanzen und bestimmter Lebensgemeinschaften wichtig sind. Beispielsweise spielen Kornstruktur, Porosität, Wassertransportverhalten, Quellfähigkeit, Adsorptions-/Desorptions-Eigenschaften der in den mineralischen Bestandteilen auftretenden Grenzflächen und Erosionsverhalten neben der chemischen Zusammensetzung eine Rolle.

Hinzu tritt die gesamte hochkomplexe biologische Komponente des Bodens, darin enthalten u.a. freie organische Verbindungen, biogene Makromoleküle, Pflanzenwurzeln und Pilze, mehrzellige Klein- und Kleinstlebewesen, Hefen, Bakterien und Protisten. Das Zusammenspiel von mineralischen Bestandteilen, Wasser und diesen vielfältigen Organismen mit den oberirdischen Teilen der Pflanzen und den dort lebenden Tieren prägt die ökologischen Verhältnisse. Der Boden ist ein ungeheuer komplexes Substrat, das die gesamte Lebensfunktion eines Standortes ausmacht und deshalb ganz wesentlich dessen biologische Produktivität und Robustheit bestimmt.

Eine besondere Rolle nehmen dabei die im Boden lebenden Mikroorganismen ein. Die überirdisch sichtbare Diversität der Pflanzengemeinschaften ist nur ein kleiner Teil der Gesamtdiversität der Lebensgemeinschaften, zu denen die Bodenorganismen einen ganz wesentlichen Beitrag leisten.



Das ist auch der Grund, weshalb die Böden eine überaus wichtige Rolle für eine nachhaltige Landwirtschaft spielen. Ihre metabolische Leistung ist Bestandteil der biologischen Gesamtleistung. Ihre Anpassungsfähigkeit ist ausschlaggebend für die Gesamtanpassungsfähigkeit und das evolutive Potenzial eines Standortes. Bodenpflege kann deswegen auch nicht auf den mineralischen und Wasserhaushalt beschränkt werden. Die Bodenstruktur und vor allem die Bodenlebewesen sind eine der wichtigsten Ressourcen für die Landwirtschaft überhaupt. Das Zusammenspiel von Pflanzenwurzeln und Pilzen, Kleinlebewesen und Bakterien macht die Vitalität eines Bodens aus.

Der Komplexität der Organismenzusammensetzung der meisten Böden an den einzelnen Standorten entspricht eine enorme Variabilität in der Zusammensetzung der unterschiedlichen Böden. In der Zusammensetzung dieser Lebensgemeinschaften verbergen sich ein großer Informationsinhalt und ein hohes Maß an Ordnung. Das biogeochemische Potenzial der Gesamtheit der auf der Erde vorkommenden Böden ist ein riesiger ökologischer Schatz. Zugleich ist jeder Boden ein hochdynamisches Gebilde, dessen Struktur und dessen chemische und biologische Zusammensetzung sich mit den Umweltbedingungen und den Jahreszeiten beständig ändern. Diese Vielfalt und Dynamik gilt es zu bewahren und für das breite Aufgabenspektrum der zukünftigen Landwirtschaft im Rahmen der nachhaltigen Gesamtwirtschaft nutzbar zu machen.

Es erscheint praktisch ausgeschlossen, Vielfalt und Entwicklungspotenzial der auf der Erde heute vorhandenen Böden zu archivieren und zu konservieren. Auch bezüglich der Böden ist ein Einfrieren des gegenwärtigen Zustands weder möglich noch zweckmäßig. Deswegen muss die zukünftige Flächennutzung der Erdoberfläche durch die Landwirtschaft Rahmenbedingungen schaffen, die nicht unbedingt den Zustand des einzelnen Bodens, wohl aber den Charakter der enormen Vielfalt der Böden auf der Erde bewahrt und dessen weitere Entwicklung zulässt und fördert.

Für den Zustand eines Bodens ist die mikrobielle Komponente von ganz besonderer Bedeutung. Deshalb muss die Landnutzung insbesondere der Schonung der mikrobiellen Ressourcen Rechnung tragen und die Fähigkeit zur Anpassung in den mikrobiellen Gemeinschaften fördern. Das schließt auch die Forderung ein, die Landnutzung so zu gestalten, dass evolutive Prozesse der Bodenmikroorganismen und ihrer Gemeinschaften gefördert werden. Aus Untersuchungen zu Metagenomen von Bodenbakterien ist bekannt, dass biologische Produktivität und Diversität keineswegs immer korrelieren müssen. Stattdessen findet sich in den Böden stark gestörter natürlicher Lebensgemeinschaften oft eine höhere Diversität der Bodenbakterien als in den gut entwickelten natürlichen Ökosystemen. Landwirtschaft muss demzufolge die Fluktuation natürlicher Bedingungen, die Ökosysteme stressen, zulassen und kann gleichzeitig durch ein passendes Maß von ökologischem Stress durch die Bodenbearbeitung und wechselnde Nutzungen evolutive Prozesse – vor allem der beteiligten Mikroorganismen – fördern und damit die Diversität in den einzelnen Lebensgemeinschaften und auf der Erde insgesamt erhöhen.

Auch für diese Anforderung erscheinen eine Teilflächenstruktur und die Architektur von landwirtschaftlichen Kulturen und in unterschiedlichem Maße frei entfalteteten

Lebensgemeinschaften, besonders geeignet. Dieses allgemeine Flächenstrukturkonzept verbindet die Gewährleistung spontaner Bodenentwicklung in naturbelassenen und naturnahen Arealen mit einer an eine effiziente landwirtschaftliche Produktion angepassten Bodenentwicklung, wobei diese aber so gepflegt sein muss, dass auch für die intensiv bewirtschafteten Teilflächen die Nachhaltigkeit der Bodennutzung gesichert bleibt.

## **Hierarchische Flächengliederung und die Skalenlücke im Meterbereich**

Natürliche Landschaften weisen häufig keine klare Gliederung auf. Wo nicht deutliche geomorphologische Grenzen – wie etwa Küsten, Berghänge oder wechselnder geologischer Untergrund – für Sprünge in den lokalen Umweltbedingungen sorgen, vollziehen sich auch die Veränderungen in den Biotopen eher allmählich. Es entstehen große zusammenhängende Flächen vergleichsweise homogener Vegetation. Wälder und Tundren des nördlichen Asiens sind dafür ein recht anschauliches Beispiel. Die räumliche Verteilung von Bäumen und bestimmten Lebensgemeinschaften ist mehr oder weniger stochastisch. Darin spiegelt sich das Fehlen eines lokalen und regionalen Ordnungsprinzips wider. Die Landschaft trägt keine speziellen Informationen zu einer über die natürlichen geographischen Faktoren hinausreichende Flächengliederung.

Ganz anders sehen Kulturlandschaften aus: Produktionsbedingungen, Verkehr, Handel und soziale Strukturen bestimmen neben den naturräumlichen Voraussetzungen die Flächenstruktur. Die Parzellierung der landwirtschaftlichen Nutzflächen ist dabei nur die unterste Ebene einer Flächengrößenhierarchie, die nach oben von den Siedlungsstrukturen überformt wird. Die Landschaft gliedert sich in Zugehörigkeitsbereiche und Bereiche bevorzugter Typen landwirtschaftlicher Produktion oder forstwirtschaftlicher oder auch gewerblicher Nutzung. Mehr oder weniger deutlich spiegelt sich in vielen Kulturlandschaften die Hierarchie der Siedlungsgrößen – vom Einzelhof über den Weiler, das Dorf, die Kleinstadt, das Mittelzentrum, die Großstadt und die Metropole – in der Flächenstruktur wider. Die Hierarchien in der überwiegend agrarisch genutzten Kulturlandschaft beruhen auf langen Traditionen. Historische Beispiele für Größenelemente oberhalb der einzelnen Parzelle sind z.B. die Gewanne eines Dorfes, Rodungszonen um einzelne Dörfer oder Dorfgruppen, Siedlungskammern, für die herrschaftliche Jagd reservierte Waldareale oder auch ausgedehnte und nach außen abgegrenzte Stadtfuren. So ergab sich auch in den historischen Kulturlandschaften eine ausgesprochene Hierarchie der Flächengliederung, die nicht nur ein nach wirtschaftlichen und rechtlichen Gesichtspunkten gebildetes Muster darstellte, sondern zugleich auch ein Mosaik von Kulturbiotopen bildete. Selbst für das Neolithikum, also für einen Zeitraum, der in Mitteleuropa 4000 bis 8000 Jahre zurückreicht, wird in den agrarisch genutzten Gebieten bereits ein Flächenmosaik angenommen. Die hierarchisch gegliederte Fläche verkörpert ein lokales und regionales Ordnungsprinzip und die dazu gehörigen Informationen. Eingebundene natürliche lokale Lebensgemeinschaften – etwa natürliche Hecken oder Gehölzstücke – und die für die landwirtschaftliche Flächennutzung gegliederte Fläche verkörpern

Strukturinformationen und stellen damit gegenüber einer zufälligen Landschaft und stochastischen Verteilung von Lebensgemeinschaften einen Zustand reduzierter Entropie dar. Diese Strukturinformation bedeutete für die frühere agrarische Nutzung einen Vorteil gegenüber einer zufälligen Flächenstruktur. Sie war ökonomisch, gesellschaftlich und ökologisch zweckmäßig. Mit der Mechanisierung der Landwirtschaft und den damit verbundenen Flächenzusammenlegungen wurde aus ökonomischen Gründen diese komplexe Flächengliederung in weiten Teilen aufgegeben und viele strukturierende Landschaftselemente wurden beseitigt. Das gestattete zwar eine effizientere agrarische Produktion, verminderte aber den ökologischen und oft auch den gesellschaftlichen Wert einer Landschaft – etwa für den Tourismus. Der Strukturverlust in der historischen Kulturlandschaft ist ein Verlust an systemischer Information. Die kaum gegliederte großflächige agrarische Nutzlandschaft stellt gegenüber der feingliedrigen historischen Kulturlandschaft einen Zustand höherer Entropie dar.

Der zweidimensionalen Hierarchie in den Flächenelementen steht eine Hierarchie in den dreidimensionalen Bodenstrukturen gegenüber, die sich von den Abmessungen der größeren Gesteinsfragmente und Makroporen – d.h. dem Zentimeter- bis Millimeterbereich – über die Abmessungen von Mineralen und Mikroporen im sub-Millimeter- bis Mikrometerbereiche bis zu den Nanostrukturen, d.h. auf die Skala von Nanopartikeln, Molekülen und Atomen herunterzieht.

Für den Skalenbereich zwischen den Bodenstrukturen (ca. cm bis dm) und den Parzellengrößen der modernen Landwirtschaft (ca. 0.1 bis 1 km) liegt aktuell eine Gliederungslücke auf der Längenskala, die so z.B. wegen ihrer Kleinteiligkeit bei manchen historischen Nutzungsverhältnissen oder auch im kommerziellen Gartenbau nicht existiert, wohl aber in Siedlungsgärten. Es wird hier die Vermutung ausgesprochen, dass die zukünftige Organisation der nachhaltigen Landwirtschaft diesem Abschnitt der Längenskala – es sind immerhin vier Größenordnungen der Länge, mithin acht Größenordnungen in der Fläche – wieder mehr Beachtung schenken wird. Ökologische Landnutzung, Integration von Produktion, Naherholung und Naturschutz sowie eine zunehmende landschaftsästhetische Aufmerksamkeit werden aller Wahrscheinlichkeit nach wieder zu einer stärkeren Gliederung und damit einer Akkumulation von Strukturinformation, d.h. einer Reduzierung der Entropie in der Fläche führen.

## Teil V: Transformation und kulturelle Kontinuität

### Wille zum globalen Handel

Die globalen Dimensionen der Landnutzung, der Nutzung der Meere und der Rohstoffquellen durch die Industriegesellschaft sind zum globalen Sündenfall geworden. Völlig zu Recht ist das uralte menschliche Vertrauen erschüttert, dass unsere Eingriffe in die Natur von dieser über kurz oder lang kompensiert oder zumindest ohne wesentliche Änderungen der natürlichen Lebensbedingungen toleriert werden. Die drastische Verletzung des Nachhaltigkeitsprinzips durch die massenhafte Ausbeutung der fossilen Energie- und Rohstoffquellen, die flächenhafte Umwandlung von Natur- in Kulturlandschaften und die massive Verteilung von Abprodukten wie etwa CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, in den Meeren und im Boden haben einen Zustand herbeigeführt, der die natürlichen Regelmechanismen überfordert. Der gegenwärtige Zustand, der auf dem ständigen weiteren Verbrauch dieser Ressourcen beruht, kann auf Dauer nicht erhalten bleiben.

Hilft eine radikale Lösung durch Technikverzicht? Lässt sich das Rad der Entwicklung zurückdrehen? Was würde eine drastische Reduktion der industriellen Entropieproduktion bedeuten?

Ein radikaler Einschnitt und die Rückkehr zur Wirtschafts- und Lebensweise des vorindustriellen Zeitalters würde zwangsläufig die übergroße Mehrzahl der Menschen in eine Situation eines geringen materiellen Lebensniveaus zurückführen. Maschinelle Arbeit müsste wieder durch Handarbeit ersetzt werden, die tierische Arbeitskraft würde wieder größere Bedeutung gewinnen. Es müsste wieder ein viel größerer Anteil der Bevölkerung in der Nahrungsmittelerzeugung tätig sein. Die Produktion von Gebrauchsgütern würde drastisch reduziert. Bruttosozialprodukt und Lebensstandard würden stark sinken. Die landwirtschaftlichen Flächenerträge würden bei Reduzierung der Mineraldüngung und des Pestizideinsatzes wahrscheinlich deutlich zurückgehen. Der Fleischkonsum würde stark eingeschränkt werden, um über pflanzliche Nahrungsmittel eine ausreichende Versorgung der Bevölkerung zu erreichen. Der gesellschaftliche Freiraum für Kultur, Bildung und Wissenschaft würde eingeschränkt werden, was wohl zu einem deutlichen Absinken des Bildungsniveaus und in der Folge im Zusammenhang mit der Reduzierung des materiellen Lebensniveaus auch zu einer Verschlechterung der hygienischen Verhältnisse und der medizinischen Betreuung führen würde. Die Lebenserwartung würde sinken und die Kindersterblichkeit wieder ansteigen. Versorgungsengpässe in den Städten und die Auflösung städtischer Sozialstrukturen würden große soziale Spannungen zur Folge haben. Alles in allem wären drastische Einschnitte in der industriellen Produktion mit einer erheblichen Verminderung

der Lebensqualität, mit einer Zunahme der individuellen Lebensrisiken und mit hohen gesellschaftlichen Risiken verbunden. Das will die übergroße Mehrheit der Menschen nicht.

Entropieproduktion durch hohen Energie- und Materialumsatz ist eine absolut notwendige Begleiterscheinung der modernen Industriegesellschaft. Will man die funktionierenden gesellschaftlichen Strukturen erhalten, muss man auch die mit der Produktion, mit Verkehr und Kommunikation verbundene Entropieproduktion in Kauf nehmen. Deshalb ist das prinzipielle Problem der Industriegesellschaft nicht die konsequente Unterdrückung der Entropieproduktion, sondern ihre nachhaltige Organisation. Diese muss sich aus zwei Komponenten zusammensetzen: Erstens der Optimierung der gegenwärtig genutzten Entropie-erzeugenden Prozesse, und Zweitens die Suche nach neuen, vollständig nachhaltigen Strategien.

Tatsächlich folgen die Maßnahmen zur Energiewende genau dieser Forderung: Einsparung von Energie auf der einen Seite – ohne jedoch die grundsätzliche Leistung der entropieproduzierenden Prozesse einzuschränken, Ausbau der nachhaltigen Energieversorgung auf der anderen Seite durch Substitution fossiler Energiequellen durch regenerative Verfahren.

Im Zentrum der Optimierung bestehender Verfahren steht ein Sparsamkeitsprinzip: Sparen bedeutet dabei nicht den Verzicht auf bestimmte Leistungen, sondern eine Minimierung des dafür erforderlichen Einsatzes. Das bezieht sich nicht nur auf den Energieverbrauch, sondern auf die Minimierung der gesamten Entropieproduktion. Das Sparsamkeitsprinzip ist in Bezug auf die Entropieproduktion eine fundamentale Eigenschaft gleichgewichtsferner Systeme. Schon einfache, abiotische Systeme folgen Prozessentwicklungswegen, die aus den Bereichen hoher Entropieproduktion in die Richtung verminderter Entropieproduktion verlaufen. Der Schlüsselparameter ist dabei die Entropieproduktionsdichte, also die pro Zeit- und pro Volumeneinheit entstehende Entropie. Nach dem Prinzip von Glansdorff und Prigogine bewegen sich alle gleichgewichtsfernen Systeme auf einen Zustand minimaler Entropieproduktionsdichte zu. Gleichgewichtsferne stationäre Zustände – die immer mit einer Produktion von Entropie verbunden sind – stabilisieren sich im Allgemeinen durch die Minimierung der Entropieproduktion. Ein schönes physikalisches Beispiel dafür ist die Synchronisierung von gekoppelten schwingenden Systemen mit unterschiedlicher Eigenfrequenz: Die auftretenden Phasendifferenzen bedeuten Potenziale, deren Ausgleich stets einen Energieverlust und eine Freisetzung von Entropie zur Folge hat. Diese Vorgänge bewirken eine Annäherung der Phasen und bei ausreichend starker Kopplung eine Synchronisation. Nach Erreichen des synchronen Zustandes sind die Differenzen in den Phasen und damit auch die Summen der Elongationen in den einzelnen Zeitintervallen minimal. Es genügen jetzt ein relativ kleiner Energiefluss und damit eine kleine Entropieproduktion in der Kopplung um den synchronen Zustand aufrechtzuerhalten. Damit ist nach der Synchronisation ein Zustand minimaler Entropieproduktion erreicht.

Die Minimierung von Produktionskosten, die Einsparung von Energie und die Reduktion des Materialeinsatzes sind typischer Ausdruck einer Verminderung der Entropieproduktionsdichte.

Dazu gehören heute bereits effizientere Maschinen, besser gedämmte Häuser, höhere Wirkungsgrade in der Energieerzeugung und Energiewandlung, Computer und Kommunikationssysteme mit geringer Leistungsaufnahme, spritsparende Fahr- und Flugzeuge und eine verbesserte Logistik im Transportwesen. Dazu gehören aber auch Pfandsysteme, das Recycling von Materialien und die Reduzierung der Abgabe und Verteilung von Schadstoffen und Produkten in der Umwelt.

Eine solche Minimierung der Entropieproduktion findet einen breiten Konsens, da sie im Interesse sowohl der meisten Produzenten als auch der Konsumenten ist. Die landläufige Einsicht in die Notwendigkeit der Kostenersparnis durch rationelleres Wirtschaften und das allgemeine Streben nach Effizienzsteigerungen unterstützt diese positive Haltung. Eine Minimierung der Entropieproduktionsdichte innerhalb der aktuell bestehenden Strukturen wird deshalb im Allgemeinen gewollt.

Viel kritischer ist jedoch die Suche nach einem gesellschaftlichen Konsens bei strukturellen Veränderungen zur Verminderung der Entropieproduktion. Gibt es Wege, die zwischen einer radikalen Einschränkung der Entropieproduktion und der damit verbundenen weitgehenden Aufgabe bestehender Strukturen und der Inkaufnahme der damit verbundenen sozialen Risiken oder auch nur Veränderung von Gewohnheiten auf der einen Seite und der nur graduellen Verbesserung im Rahmen der aktuell herrschenden industriellen Strategien vermitteln?

Eine rationale Diskussion und vernünftige Entscheidungen sind nur möglich, wenn es klare Maßstäbe für eine Bewertung von Chancen und Risiken gibt. Für die Suche nach Bewertungsmaßstäben kann wieder das Konzept der Akkumulation von Strukturen, d.h. von Negentropie in den beteiligten Systemen helfen. Dieses Konzept schließt einerseits die weitgehende Beibehaltung, Schonung und Pflege aller Arten vorhandener Strukturen ein, deren Funktionalität gebraucht wird. Andererseits lässt es die Entwicklung und Integration neuer Strukturen zu. Nur so können bewährte Mechanismen erhalten, neue Mechanismen entwickelt und fehlerhafte Strukturen schrittweise ersetzt werden. Betroffen sind davon alle Arten von funktionalen Strukturen: biologische Strukturen wie Lebensräume und Lebensgemeinschaften, Siedlungsstrukturen vom Einzelhaus bis zur Megacity, industrielle Strukturen von der Manufaktur bis zur chemischen Großfabrik, Wirtschaftsstrukturen vom fliegenden Händler bis zu internationalen Konzernen und Handelsnetzwerken sowie Sozialstrukturen von der Familie bis zu Internetkommunikationsgemeinschaften, d.h. die gesamten vielfältigen Strukturen im globalen, lokalen und regionalen Maßstab.

Die Umstellung auf eine komplett nachhaltige Wirtschaft folgt damit einem semikonservativen Grundprinzip: Funktionalitäten bleiben erhalten, und die ihnen zu Grunde liegenden Strukturen und Mechanismen bleiben geschützt, bis sie durch etwas Zweckmäßigeres ersetzt werden können. Dieses Prinzip entspringt nicht der biologischen Evolution, sondern setzt eine kritische Analyse, eine ethische Bewertung, einen breiten Diskurs und ein planmäßiges Handeln voraus. Es verlangt nach

dem Primat einer umfassenden Funktions-Ethik. Diese schließt auf der einen Seite eine konsequente Bewahrung gewachsener Strukturen ein, solange diese nicht für funktionale Problemen verantwortlich sind, die durch neue – weniger problematische – Strukturen ersetzt werden können. Auf der anderen Seite schließt diese Funktionsethik die konsequente Schaffung von Freiräumen für neue funktionale Strukturen und die Substitution überholter funktionaler Strukturen ein.

Trotz aller Schwierigkeiten stellt die Entwicklung eines Konsens im ethischen Bereich ein lösbares Problem dar. Die Auseinandersetzung über einen solchen Konsens wird dabei immer auch vor dem Hintergrund der historisch überkommenen Sozialstrukturen geführt werden, die fast überall trotz innerer Widersprüche eine große funktionale Bedeutung haben. Aber diese Diskrepanzen können überwunden werden, ohne funktional wertvolle Strukturen aufzugeben, wenn eine Priorisierung ethischer Grundsätze erfolgt. Diese bauen heute – wenn man die aktuelle Situation aus westlicher Sicht betrachtet – vor allem auf drei Grundsätzen auf: 1. Der Freiheit und Würde des einzelnen Menschen, 2. Der Freiheit von Wirtschaft und Handel und 3. Der Organisation des internationalen Zusammenlebens nach einem historisch gewachsenen National- und Völkerrecht.

Diese drei Grundsätze haben zweifellos nicht nur Berechtigung, sondern große Bedeutung. Aber sie lassen die entscheidende Bedeutung der Komplexität funktioneller Hierarchien und der in den funktionierenden Systemen akkumulierten Information weitgehend außer Betracht und reduzieren diese auf die drei Ebenen des Individuums, der Staaten und des Marktes. Am augenfälligsten wird dieser Mangel am Fehlen der ethischen Einordnung der Lebensumwelt und der natürlichen Ressourcen. Die Erhaltung der langfristigen Fähigkeit zum Entropieexport, die Bewahrung der globalen und lokalen Ökosystemfunktionen zur Organisation von Nachhaltigkeit in der Stoff- und Energiewandlung und die für diese beiden Aufgaben erforderlichen lokalen und regionalen Sozialstrukturen sind trotz allem „grünen Denken“ der letzten Jahre im Verhältnis zur Freiheit des Individuums, des Marktes und der handelnden – d.h. der handlungsmächtigen – Staaten nachgeordnet.

Der Wille zum Handeln muss mit einer Korrektur dieser ethischen Schiefelage einhergehen. Das – nur längerfristig zu erreichende – Ziel einer komplett nachhaltigen Wirtschaft braucht als oberste Maxime die langfristige Organisation der Entwicklung der dafür notwendigen funktionalen Strukturen: der sozialen, der ökonomischen und der ökologischen. Den ethischen Maßstäben, die dem heutigen Menschen-, Wirtschafts- und Völkerrecht zu Grunde liegen müssen mit höchster Priorisierung ethische Maßstäbe für Sozial-, Wirtschafts- und ökologische Strukturen an die Seite gestellt werden, die im Dienst der Entwicklung der langfristigen Nachhaltigkeit stehen. Mit dem Wissen um die Bedeutung hierarchisch aufgebauter Strukturen und der in ihrem Aufbau steckenden systemischen Information für nachhaltige Funktionalität muss eine ethische Neubewertung dieser Strukturen vorgenommen werden und muss ihre Einordnung in der Werteskala korrigiert werden.

So ist es aus Sicht nachhaltigen Wirtschaftens z.B. völlig einseitig, Naturschutz im Wesentlichen über den Artenschutz zu definieren. Neben dem Schutz lokaler Populationen sowie von Arten und

höheren Taxa brauchen wir auch die Vielfalt von Sorten und Rassen, Vielgestaltigkeit der Lebensgemeinschaften, Vielfalt der ruhenden Lebensformen, Bedingungswechsel für die Aktivierung solcher Ruheformen und die Ablösung aktiver Gemeinschaften durch andere. Wir brauchen sowohl die Robustheit der Ökosysteme als auch ihre Plastizität, ihre Anpassungsfähigkeit und ihr Entwicklungspotential.

Und wir brauchen auch nicht nur den einzelnen Menschen. Wir brauchen auch die funktionierenden sozialen Gruppen in ihren vielfältigen Formen, von Freundschaft und Lebenspartnerschaft über Ehe und Familie, Clan, Dorfgemeinschaften, Stamm und Volk bis hin zu Arbeitsgruppen, Belegschaften, Interessens- und Berufsverbänden, Parteien, Lobbyisten und Internetplattform-Gemeinschaften.

Alle Strukturen der Natur und menschlichen Kultur, die wir auf der Erde vorfinden, sind nicht primär ein Produkt zufälliger Ereignisse. Vielmehr sind sie das Ergebnis der Akkumulation von Information. Sie sind Resultat einer langfristigen Gestaltbildung und Funktionsentwicklung, die sich trotz eines hochgradigen stochastischen und Spielcharakters der ihnen zu Grunde liegenden Evolution vollzogen hat. Sie sind Verkörperung des Zeitpfeils, der Irreversibilität in den natürlichen Abläufen und der Fähigkeit des getriebenen Systems Erde, Erfahrungen zu sammeln, zu lernen und Komplexität aufzubauen. Sie sind damit auch Ausdruck der komplexen Fähigkeit des Lebens auf der Erde, Entropie-Export mit immer besserer Effizienz zu organisieren und den Entropie-Export im Gegenzug zu nutzen, um immer komplexere Strukturen zu generieren, also immer weitere Variabilität und Informationspotenziale zu schaffen. Der Übergang aus der hochgradig nicht-nachhaltigen Industriegesellschaft zu einer zukünftigen global nachhaltig wirtschaftenden Gesellschaft muss sich in diesen Lern- und Akkumulationsprozess einordnen.

Es ist völlig klar, dass sich diese sehr unterschiedlichen Strukturen nicht in ein uniformes Gesetzbuch und auch nicht in eine einfache einheitliche lineare Werteskala bringen lassen. Vernünftige ethische Maßstäbe müssen deshalb differenzieren – nach aktueller Situation und zukünftiger Anforderungen, nach Leistungsfähigkeit und Ressourcenlage, nach akutem Bedarf und Nachhaltigkeit, nach historischen und traditionellen, kulturellen und religiösen Voraussetzungen. In diesen Kriterien für die Gestaltung einer verzweigten Werteskala spiegeln sich die existierenden funktionalen Strukturen und ihre erwartete Bedeutung für die künftige Entwicklung wider. Auch wenn nicht alles detailliert prognostiziert werden kann, so ist doch klar, dass das Kriterium des nachhaltigen Handelns ganz oben in dieser Wertehierarchie stehen muss. Darunter ordnen sich die anderen Werte mit Rücksicht auf die gewachsenen Strukturen und im Hinblick auf die zukünftige Funktionalität ein. Der globale Wille zum Handeln setzt eine Ethik der Strukturen voraus.

## **Fähigkeit zum globalen Handeln**

Dem Willen zur Tat muss die Fähigkeit zur Tat zur Seite stehen, damit es zum Handeln kommt. Dazu müssen zwei Gruppen von Voraussetzungen erfüllt sein, zum einen die technischen Fähigkeiten zum



Handeln und zum anderen die Verfügbarkeit von Handlungsspielraum. Für diese beiden Voraussetzungen lassen sich heute klar die Verantwortungsbereiche unterscheiden: Wissenschaft und Technik sind zuständig, um die technischen Handlungsvoraussetzungen zu schaffen, die technischen Handlungsmöglichkeiten nach Breite und Wirksamkeit zu erweitern, die Konsequenzen von Entscheidungen und Handlungen immer besser vorherzusagen und die Bewertungskriterien für den Sinn und die Zweckmäßigkeit der technischen Maßnahmen kontinuierlich zu verbessern. Wirtschaft und Politik sind zuständig, um die Handlungsspielräume zu schaffen, um Entscheidungen herbeizuführen, durchzusetzen, die erforderlichen Ressourcen bereitzustellen und die Konsequenzen von Entscheidungen für die Gesellschaft tragbar zu machen.

Handlungsspielräume entstehen nicht durch Verzicht auf Technik und Fortschritte in der Naturwissenschaft, sondern durch die Entwicklung neuer technischer Lösungen und neue Einsichten in die Strukturen und Gesetze der Natur. Wissenschaftlich-technischer Erkenntnisgewinn ist Bestandteil der kulturellen Entwicklung. Er ist Ausdruck der Umsetzung eines Teils unseres Entropieexportpotenzial in die Akkumulation von Information. Verzicht auf naturwissenschaftliche Forschung und technische Entwicklung ist nur gerechtfertigt, wenn sie mit erheblichen und nicht beherrschbaren Risiken verbunden ist. Jede andere Form der Beschränkung von Wissenschaft und Technik durch die Menschheit als Ganzes ist gleichbedeutend mit einem Verzicht auf Information, Verzicht auf Struktur und Komplexität, Verzicht auf Entwicklungs- und Anpassungspotenzial, Verzicht auf Wettbewerbs- und Überlebensfähigkeit und bedeutet ein Verhalten gegen den Zeitpfeil, Rückschritt und ist deshalb prinzipiell zum Scheitern verurteilt.

Ein Gewinn an Handlungsfreiheit entsteht aber auch nicht durch Missachtung vorhandener – und zumindest in einem aktuellen Rahmen - leistungsfähiger Strukturen, durch Umwertung aller Werte und Bruch mit allen Traditionen. Radikale Schnitte bedeuten stets auch den Verzicht auf vorhandene wertvolle Instrumente, Methoden und Informationen und bedeuten damit auch den Verzicht auf Handlungsoptionen und Handlungspotenzial. Auch wenn nicht-nachhaltige Technologien abgelöst werden müssen, so hilft eine Einstellung der Produktion und völliger Neubeginn nicht, wenn dadurch zwischenzeitlich wichtige Versorgungsaufgaben nicht mehr erfüllt werden können, technologische Brüche entstehen, die nicht kompensiert werden können und in ihrer Folge wirtschaftliche und soziale Strukturen zusammenbrechen. Radikale Schnitte können zwar kurzfristige Freiräume entstehen lassen, häufig sind sie jedoch mit einem Struktur- und Informationsverlust verbunden, der durch die Gewinne im Freiraum nicht ausgeglichen werden kann.

Technische Handlungsfähigkeit entsteht durch die Kombination von wissenschaftlichem und technischem Fortschritt mit paralleler Nutzung verfügbarer Technologien und der Entwicklung von Brückentechnologien, die die Sicherung wichtiger existierender Strukturen und Abläufe übernehmen, wenn überholte Technologien abgelöst werden müssen, aber die neuen Technologien noch nicht zur Verfügung stehen.

Der Komplementarität von technologischer Tradition und technischem Fortschritt zur Verbesserung der technischen Handlungsfähigkeit steht die Komplementarität von sozialem und wirtschaftlichem Fortschritt und überkommenen Sozial- und Wirtschaftsstrukturen gegenüber. Die Einsicht in den Wert von Sozialstrukturen auf allen Hierarchieebenen und das Wissen um die Konsequenzen sozialer Veränderungen sind wichtige Voraussetzungen zur Erlangung der wirtschaftlichen und sozialen Handlungsfähigkeit zur Gestaltung einer nachhaltigen Weltwirtschaft. Neue Sozialordnungen und Wirtschaftsformen können die gesellschaftliche Handlungsfähigkeit verbessern. Dazu müssen häufig bestehende Wirtschaftsformen verändert und alte Sozialstrukturen abgelöst werden. Aber auch hier ist ein radikaler Umbau oft schädlich oder mündet sogar in katastrophale Verhältnisse. Strukturabbau bedeutet zuallererst Verlust an Ordnung, gewissermaßen also die Zunahme der Entropie im System. Aktionsvermögen setzt aber Ordnung und Strukturen voraus. Die Forderung nach sozialen Veränderungen muss deshalb vom Respekt vor der Funktionalität der aus den lokalen oder regionalen Bedingungen hervorgegangenen Strukturen getragen werden. Nur durch Erhaltung und Ausbau dieser Funktionalität und ihrer Integration in eine Bildung neuer globaler Ordnungsstrukturen, die dem Ziel einer ökologischen Weltinnenpolitik dienen, kann die Fähigkeit zum globalen Handeln hergestellt werden. Auch deshalb ist es im Interesse eines nachhaltigen Wirtschaftens unabdingbar, der Menschenrechts-Ethik eine Ethik der Sozialstrukturen an die Seite zu stellen.

### **Verpflichtung zur Vorsorge: Entropieexport-Reserven**

Der ressourcenzehrende Charakter unserer gegenwärtigen Industriegesellschaft entspricht dem Bild einer Menschheit, die sich als Hauptstörfaktor des globalen ökologischen Gleichgewichts manifestiert hat. Dieser Eindruck ist berechtigt und zwingt die Menschheit im Interesse einer gesunden Biosphäre und im eigenen Interesse zum Handeln. Dieser Eindruck darf jedoch nicht den Blick davor verschließen, dass der Mensch nicht der einzige Faktor ist, der zur Destabilisierung des globalen Ökosystems führt. Die Idee von langzeitstabilen Ökosystemen, von einem anhaltenden natürlichen Gleichgewicht, von konstanten Umweltbedingungen und von einer natürlichen Harmonie im Wechselspiel der Pflanzen und Tiere, Pilze und Mikroorganismen auf unserer Erde ist eine Illusion.

Auch ohne Zutun des Menschen verändert sich die Umwelt, werden scheinbar stabile und harmonische Lebensbedingungen gestört. Am auffälligsten sind die plötzlich eintretenden geologischen oder astronomische Katastrophen, die als natürliche Störungen wahrgenommen werden: Erdbeben und Vulkanausbrüche, chaotische Veränderungen in der Sonnenaktivität und Einschläge von Himmelskörpern auf der Erde.

Doch sind stochastisch auftretende Ereignisse bei weitem nicht die einzigen natürlichen Ursachen für die Störung einer konstanten harmonischen Umwelt. Die Konvektionsströme im Erdmantel und

die langsame, aber permanente Drift der Kontinentalplatten, die Präzession der Erdachse und die Überlagerung dieser Vorgänge mit dem Jahresumlauf der Erde, mit der allmählichen Veränderung von Meeresströmungen und schnellen Wechseln in der atmosphärischen Zirkulation und Gezeiten sorgen für die Mischung und Überlagerung periodischer und episodischer Ereignisse auf unterschiedlichen Zeitskalen.

Hinzu tritt die Dynamik der lebenden Systeme, der Entwicklung von Populationen und Arten, Biotopen und Lebensgemeinschaften. Deren charakteristische Zeitskalen reichen von den Generationszeiten schnell wachsender Mikroorganismen, d.h. etwa 20 Minuten, bis zu den Jahrmillionen-Zeiträumen bei der Bildung vieler neuer Gattungen und Arten, die die biologische Zusammensetzung und den ökologischen Charakter ganzer Lebensräume verändern. So birgt die Lebenswelt selbst und ihre Kopplung mit den abiologischen Prozessen ein riesiges Potenzial an Dynamik, an Veränderungskraft und zum Teil schwer vorhersehbarer Instabilität.

Alle diese Wechsel – kosmische, geologische und biologische – sind Ausdruck des irreversiblen Charakters in ihrer Dynamik. Auch wenn mit der Bewegung der Gestirne, dem täglichen Lauf der Sonne und dem jährlichen Wechsel von Jahreszeiten, Vegetationsphasen und Wachstumszyklen die Wiederkehr, die Wiederholbarkeit, Periodizität und Gleichförmigkeit zu dominieren scheint, so sind diese regelmäßigen Wechsel doch nur eine Modulation auf der permanenten, gerichteten Veränderung, der alle Systeme und Prozesse unterliegen. Die scheinbar unveränderlichen Periodizitäten sind nur das momentane äußere Erscheinungsbild des unerbittlichen Zeitpfeils, dem alle Vorgänge unterliegen, die kein echtes Gleichgewicht darstellen. Alle wirkliche Veränderung ist letztlich unumkehrbar. Auch jedem Ablauf, jedem Ereignis, das sich in unserer Umwelt periodisch wiederholt, liegt letztlich ein irreversibles Geschehen zu Grunde. Dahinter steckt immer ein Abbau von thermodynamischem Potenzial, die Produktion von Entropie. Und nur dort, wo die Systeme in der Lage sind, Entropie an ihre Umwelt abzugeben und die eigene Entropieproduktion zu kompensieren und zu überkompensieren, wird aus der Vergangenheit gelernt, werden Strukturen aufgebaut, Information akkumuliert und Ressourcen angelegt, mit denen die Systeme auf künftige Veränderungen reagieren können.

Es gehört zu den herausragenden Merkmalen von Organismen und Ökosystemen, dass sie durch Anpassung auf Umwelt-Veränderungen reagieren können. Die auf der Erde existierenden biologischen Systeme haben durch ihre lange Evolution Erfahrungen zu solchen Veränderungen gesammelt und gespeichert. Die Vielfalt der kürzer- und längerfristigen Veränderungen der Lebensumwelt hat zu einer Akkumulation in Form expliziter Information auf den genetischen Datensätzen und zu den impliziten Informationen im Zusammenspiel der Organismen eines Lebensraumes und ihrem Wechselverhältnis zu Boden und Atmosphäre geführt. Biologische Systeme haben gelernt, auf Veränderungen auf unterschiedlichen Zeitskalen zu reagieren. Dabei sind sie selbst von den inhärenten Zeitskalen der eigenen Dynamik abhängig und die resultierenden Veränderungen der biologischen Systeme unter äußerem Stress fallen umso dramatischer aus, je drastischer die Umweltveränderungen sind.

Ein wichtiges Ergebnis evolutiver Lernprozesse ist das Vorsorgeverhalten biologischer Systeme. Beispiel dafür findet man vor allem in der Anpassung an regelmäßige und auf kürzerer Zeitskala ablaufende Veränderungen etwa der Anpassung an die periodischen Wechsel der Jahreszeiten durch Wechsel des Fells, dem Anlegen von Wintervorräten, jahreszeitangepasstem Wachstum und Paarungsverhalten. Aber es gibt auch Ergebnisse des evolutiven Lernens, die längerfristig als im Jahresrhythmus wirken und die nicht auf einzelne Individuen, Arten und Populationen beschränkt sind. Dazu gehören z.B. Bodenbildung und Regulierung des Wasserhaushaltes durch den Fall von Blättern und Nadeln oder die Ausbildung von ruhenden – dormanten – Lebensformen wie Samen und Sporen, die nicht nur das langfristige Überleben und die Verbreitung der einzelnen Art fördern, sondern auch die Lebensfähigkeit und Robustheit ganzer Biozöosen unter wechselnden Umgebungsbedingungen sichern.

Diese Ergebnisse biologisch-evolutiven Lernens stellen auch eine Form der Strukturbildung, der Ansammlung von Negentropie dar. Letztlich ordnen sie sich in die großen globalen geökologischen Prozesse ein, mit denen die Biosphäre insgesamt die relative langfristige Robustheit der globalen Umwelt sichert.

Auf den ersten Blick erscheint es im Rahmen evolutionären Denkens unlogisch, dass Lebewesen mit Lebensspannen von wenigen Jahrzehnten, maximal Jahrhunderten, dafür sorgen sollen, dass auf der Skala von Jahrhundertmillionen ablaufende Vorgänge optimiert werden. Und ganz sicherlich geht ein teleologisches Denken, das der in geologischen Zeiträumen erfolgten Ablagerung von Kohle und Bildung von Erdöl-, Erdgas- und anderen Lagerstätten seinen Sinn in einer späteren Unterstützung der Entwicklung des Menschen und seiner Industriegesellschaft zumisst, völlig an der Realität vorbei. Aber tatsächlich hat die über Jahrtausende ablaufende massenhafte Fixierung von atmosphärischem Kohlenstoff in Form von biogenen Carbonaten und fossilen Energieträgern ganz entscheidend zu einem globalen Klima und moderaten mittleren Atmosphärentemperaturen beigetragen, wie wir sie gegenwärtig auf der Erde vorfinden. Die Sinnhaftigkeit eines solchen langfristigen Verhaltens kann auf der Basis der Vorstellung einer spontanen biologischen Evolution nicht aus einem einmaligen Entwicklungsvorgang heraus erklärt werden. Der Mechanismus ist im Sinne einer evolutionären Entwicklung nur vorstellbar, wenn ein langfristiges kollektives Lernen stattgefunden hat. Dieses setzt im Allgemeinen mehrere Phasen mit wechselnden biologischen Systemmerkmalen und mit wechselnden Umgebungs- und Selektionsbedingungen voraus. Tatsächlich haben sich auf der Erde mit dem mehrfachen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten sowie Phasen hohen und niedrigeren Gehaltes an Treibhausgasen langfristige Veränderungen der Selektionsbedingungen für Populationen und Biozöosen abgespielt, die zumindest eine Mitursache für die Entwicklung von in breitem Umfang kohlenstoff-fixierenden Lebensgemeinschaften geworden sind. Die mit der Kohlenstoff-Fixierung verbundene Bildung von Lagerstätten stellt eine Strukturbildung, einen Ausdruck von globaler – biologisch hervorgerufener – Ordnung dar. Die Lagerstätten selbst – neben den fossilen Energieträger-Lagerstätten vielfach auch andere, mineralische Lagerstätten – sind Ergebnis der biologischen Aktivität unzähliger Organismen in

verschiedenen Phasen der Erdgeschichte und ihrer Fähigkeit Entropie zu exportieren und dafür Ordnung zu generieren. Diese geordneten Depots sind heute industriell nutzbar, wobei wir davon profitieren, dass sie einen Zustand reduzierter Entropie darstellen und wir das mit der Neuentstehung von Entropie verbundene Potenzial für unsere technischen Prozesse nutzen können. Deshalb nutzen wir die biogenen Lagerstätten als biologisch gebildete Entropieexportreserven.

Die Einführung einer vollständig nachhaltigen globalen Weltwirtschaft bedeutet nicht nur, dass wir weitgehend auf die Nutzung dieser in geologischen Zeiträumen angesammelten Reserven verzichten müssen, sondern dass wir auch etwas für die Regenerierung solcher Ressourcen tun und für mögliche künftige Problemphasen neue Entropieexportreserven anlegen müssen. Wenn wir Menschen uns als organischer Bestandteil einer lernfähigen Biosphäre verstehen, dann müssen wir auch lernen, die heutigen und die in naher Zukunft verfügbaren Potenziale für eine langfristige Vorsorge zu nutzen.

Tatsächlich wird – soweit wir das derzeit in allen Konsequenzen überblicken können – ein großer Teil des Entropieflusses von der Erde zum Kosmos nicht zum Aufbau von Strukturen und Ordnung auf der Erde verwendet, sondern geht verloren. Zwar nutzt die Biosphäre einen Teil der energiereichen Strahlung der Sonne für die Photosynthese, doch ein großer Teil dieser Strahlung wird auf der Landoberfläche und in den oberen Wasserschichten der Ozeane ungenutzt in Wärme umgewandelt. Ein anderer erheblicher Teil wird einfach – überwiegend durch Wolken und Eis – ins Weltall reflektiert. Nur ein verschwindend kleiner Anteil des permanent auf der Erde zur Verfügung stehenden Potenzials wird in Gestalt von Photovoltaikanlagen, Windkraftwerken und der Verwertung von photosynthetisch erzeugter Biomasse durch den Menschen genutzt.

In dieser Situation wird der globale Entropieexport im Wesentlichen durch die Entropieproduktion auf der Erde aufgezehrt. Außerdem benötigen wir noch einen Teil der während der Erdgeschichte deponierten Entropieexport-Reserven, um unseren Entropieexport-Hunger zu befriedigen. Dadurch ergibt sich gegenwärtig folgende Entropiestrombilanz:

$$d|S_{\text{out, erde}}|/dt - d|S_{\text{in, erde}}|/dt + d|S_{\text{altreserve}}|/dt = dS_{\text{prod}}/dt \quad (56)$$

Kurzfristige Nachhaltigkeit setzt in der Entropiestrombilanz voraus, dass zumindest nicht mehr Entropieexportreserven angegriffen werden, als neu geschaffen werden können. Der Ausbeutung von Lagerstätten müsste dazu vollständig eingestellt werden:

$$dS_{\text{altreserve}}/dt = 0 \quad (57)$$

Falls man nicht ohne zumindest einen gewissen Zugriff auf Lagerstätten auskommt, müsste deren Abbau durch die Anlage neuer Entropieexportreserven ausgeglichen werden:

$$d|S_{\text{altreserve}}|/dt = d|S_{\text{neureserve}}|/dt \quad (58)$$

Damit ergäbe sich folgende Gesamtbilanz:

$$d|S_{\text{out, erde}}|/dt - d|S_{\text{in, erde}}|/dt + d|S_{\text{altreserve}}|/dt - d|S_{\text{neureserve}}|/dt = d S_{\text{prod}}/dt \quad (59)$$

Langfristige Nachhaltigkeit verlangt aber nach einer zusätzlichen Schaffung von Entropieexportreserven:

$$d|S_{\text{out, erde}}|/dt - d|S_{\text{in, erde}}|/dt + d|S_{\text{altreserve}}|/dt - d|S_{\text{neureserve}}|/dt > d S_{\text{prod}}/dt \quad (60)$$

Wie könnten solche Entropieexport-Reserven aussehen? Prinzipiell sind hier der Phantasie zunächst keine großen Grenzen gesetzt. Wir wissen natürlich heute nicht, welche Formen von Entropieexportreserven in Zukunft gebraucht und gut nutzbar sein werden. Grundsätzlich ist aber anzunehmen, dass die Fähigkeit der Menschheit zur Verwertung sehr unterschiedlicher Entropieexportreserven auf Grund der zunehmenden technischen Leistungsfähigkeit wachsen wird.

Naheliegend ist es aus heutiger Sicht zum einen, Kohlenstoff aus der Atmosphäre oder aus technischen Prozessen langfristig und in konzentrierter Form zu fixieren. Zum anderen bietet sich die Akkumulation von allen Stoffe an, die industriell oder zu Düngezwecken oder in anderweitig verteilter Form vorteilhaft verwendet werden könnten.

Es gibt durchaus Beispiele, wie heute schon solche Entropieexportreserven entstehen, auch wenn die Intention der Bildung solcher Lagerreserven nicht durch den Gedanken an die Verbesserung der Nachhaltigkeit der Wirtschaft ausgelöst wurde. So sind etwa der Abbau von Lagerstätten, die wertvolle Rohstoffe nur in geringer Konzentration enthalten, und die Sammlung einzelner Inhaltsstoffe solch ein Prozess der Akkumulation von Negentropie. Als Entropieexportreserve kann das Produkt eines solchen Akkumulationsprozesses dann verstanden werden, wenn es nicht wieder verteilt, sondern in akkumulierter Form aufbewahrt wird. Die Gewinnung von Gold und Deponierung in konzentrierter Form – motiviert durch seine Nutzung als Währungsäquivalent - ist ein solches Beispiel.

## Die Übergangsphase zur Nachhaltigkeit

So wie die Mechanismen der Lebensprozesse dem möglichen Lernen und der Anpassung von Lebewesen und Ökosystemen zeitliche Untergrenzen setzen, so sind auch technische und organisatorische Anpassungsprozesse bei der Umstellung auf ein nachhaltiges Wirtschaften zeitlichen Mindestanforderungen unterworfen. Grundsätzlich können technische Systeme sehr viel schneller verändert werden, als sich ökologische Entwicklungen oder gar die biologische Evolution vollzieht. Aber die jüngere Technik- und Wirtschaftsgeschichte zeigt doch auch, dass technische Entwicklung und Reife von Technologien eine gewisse Zeit benötigen. So blickt das heutige moderne Automobil auf eine reichlich hundert Jahre alte Entwicklungsgeschichte zurück und selbst die moderne Festkörperelektronik und die Entwicklung der integrierten Schaltkreise hat rund sechs

Jahrzehnte gebraucht um den heutigen Stand zu erreichen. Chemische Fabriken haben typische Standzeiten von mehreren Jahrzehnten und die zu Grunde liegenden Entwicklungen haben einen Zeitbedarf in der gleichen Größenordnung, wenn man die Entwicklungsvorgeschichte einbezieht.

Deswegen werden sich auch die technischen Schritte auf dem Weg zu einer nachhaltigen globalen Gesamtwirtschaft nicht im Zeitraum einer Legislaturperiode oder eines Fünfjahrplans vollziehen. Eher muss von einer Aufgabe für mehrere Generationen ausgegangen werden. Das klingt zunächst eher entspannt, wenn man an das Tempo der erforderlichen Veränderungen denkt. Aber leider ist genau das Gegenteil richtig. Es darf keine Zeit verloren werden, um die nächsten Schritte einzuleiten. Gerade weil wir nicht in einem großen Wurf die ganze Wirtschaft und Technik umkrempeln können, gerade weil noch entscheidende Technologien völlig fehlen, gerade weil wir Brückentechnologien brauchen, die noch lange als Provisorien dienen müssen, ist die Lage angespannt. Denn in den kommenden Jahrzehnten, in denen sich diese Veränderungen vollziehen müssen, werden die globalen ökologischen Probleme sich weiter verschärfen, wird sich die Hypothek, die wir wie unsere Eltern und Großeltern – d.h. die Generationen der weltweiten Industrialisierung – den nachfolgenden Generationen aufbürden, noch deutlich wachsen. Während dieser Zeit müssen wir nicht nur die technologischen Voraussetzungen für ein nachhaltiges Wirtschaften schaffen, sondern auch die bereits heute deutlich spürbaren negativen Konsequenzen des ökologischen Fehlverhaltens der letzten Generationen bewältigen und den kommenden Generationen des technologischen Übergangs Wege vorbereiten, die ihnen erlauben die Summe von ökologischer und technologischer Bürde zu verkraften.

## Anmerkungen und Literatur

- [1] Die Informationen zu diesem Abschnitt stammen überwiegend aus: W. Stiller : Ludwig Boltzmann (Thun, Frankfurt/M. 1989), 84f
- [2] H.-J. Krug, U. Niedersen: Wilhelm Ostwald, Jahrbuch Selbstorganisation (Halle 1990)
- [3] W. Stiller (1989), 90
- [4] W. Ostwald 1914, zit. nach H.-J. Krug, U. Niedersen (1990)
- [5] Nachfolgende Biographische Angaben zu L. Boltzmann aus: W. Stiller 1989, 9ff
- [6] L. Boltzmann: Populäre Schriften (Leipzig 1905), 311f, zit. nach W. Stiller, 1989
- [7] Diese und folgende Angaben nach W. Stiller (1989)
- [8] L. Boltzmann: Sitzber. kaiserl. Akad. Wiss. 76 (1877), 373-435
- [9] C. v. Linde, Erfinder der Luftverfüssigungsmaschine
- [10] M. Planck: Wissenschaftliche Selbstbiographie, Leipzig 1948, diese und folgende Angaben zitiert nach W. Stiller (1989)
- [11] E.H. Riesenfeld: Svante Arrhenius (Leipzig 1931), 7
- [12] E.H. Riesenfeld (1931), 17ff
- [13] E.H. Riesenfeld (1931), 24
- [14] E.H. Riesenfeld (1931), 28
- [15] E.H. Riesenfeld (1931), 31
- [16] S. Arrhenius: Z. Physikal. Chem. 4 (1889), 96
- [17] S. Arrhenius: Z. Physikal. Chem. 4 (1889), 226
- [18] E.H. Riesenfeld (1931), 32
- [19] E.H. Riesenfeld (1931), 37
- [20] E.H. Riesenfeld (1931), 73f



- [21] E.H. Riesenfeld (1931), 34
- [22] E.H. Riesenfeld (1931), 46f
- [23] E.H. Riesenfeld (1931), 58
- [24] E.H. Riesenfeld (1931), 63ff
- [25] E.H. Riesenfeld (1931), 50
- [26] S. Arrhenius: Bihang 22, Afd. I, 1 (1896), Nr. 1
- [27] E.H. Riesenfeld (1931), 41]
- [28] W. Ebeling, R. Feistel: Physik der Selbstorganisation (Berlin 1986)
- [29] C.F. v. Weizsäcker: Die philosophische Interpretation der modernen Physik: 2 Vorlesungen, Nova Acta Leopoldina, N.F. 207 (1975)
- [30] A.H. Guth: The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins (1998)
- [31] F. Hoyle: A New Model of the Expanding Universe: Monthly Notices, Royal Astronomical Society. 108 (1948), 372–382
- [32] H.-J. Fahr: Mit oder ohne Urknall. Das ist hier die Frage (2. Aufl. Berlin, Heidelberg, 2016)
- [33] Diese und folgende Angaben zu den mittleren Verweilzeiten sind entnommen aus: D. Möller: Chemistry of the climate system, 2nd ed. Berlin-Boston 2014, Tab. 2.74
- [34] J.M. Köhler: Green Process Synth., 3 (2014), 33

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Entropie-Zunahme durch Strukturabbau: Auflösung von Salz oder Zucker in einem Wasserglas .....	6
Abb. 2 Lebewesen als Entropie-Produzenten .....	8
Abb. 3 Optimierung der Entropie-Produktion: Sparsamkeitsprinzip im Stoffwechsel .....	9
Abb. 4 Entropie-Erzeugung durch energetische Nutzung der Kohle .....	10
Abb. 5 Irreversibilität in der Natur: das Zeitpfeilargument von Wilhelm Ostwald .....	13
Abb. 6 Weitblick des Physikochemikers Svante Arrhenius (Anfang des 20. Jahrhunderts) .....	21
Abb. 7 Computer: ausgeglichene Energiebilanz und Entropie-Produktion .....	23
Abb. 8 Der Zeitpfeil im kosmischen Geschehen .....	26
Abb. 9 Das entsprechend dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, aber gegen den Zeitpfeil fahrende Auto .....	27
Abb. 10 Das Kugelexperiment: Ordnung und spontane Bewegung .....	28
Abb. 11 Repräsentation von Mikrozuständen beim Würfeln mit zwei Würfeln .....	29
Abb. 12 Konservierte und dissipative Strukturen .....	34
Abb. 13 Resonante Absorption eines Photons durch den Übergang eines Elektrons innerhalb eines Moleküls von einem niedrigeren in einen höheren energetischen Zustand .....	39
Abb. 14 Energiebilanz der Erde .....	40
Abb. 15 Die Erde als sich selbst thermisch regelndes System: Erhöhung der Oberflächentemperatur bei reduzierter Infrarot-Transparenz der Atmosphäre .....	42
Abb. 16 Die Erde mit ihrer durch den erhöhten Treibhauseffekt veränderten Entropie-Bilanz .....	43
Abb. 17 Katalytische Aktivität der RNA als Kernelement der RNA-Welt-Hypothese .....	48
Abb. 18 Dualismus zwischen vertikaler und horizontaler Variation der genetischen Information und Informationsübertragung in Lebensgemeinschaften .....	50
Abb. 19 Hierarchisches Informations-Management: Optimierung der Information durch Bewertung und Rekombination von Teildatensätzen .....	51
Abb. 20 Evolution der Informationsaustauschsysteme .....	53

Abb. 21 „Alternde Photonen“ als Ausdruck der Kopplung des kosmologischen Zeitpfeils und seiner lokalen Wirksamkeit und digitaler Charakter des Energieverlustprozesses der „alternden Photonen“ .....	56
Abb. 22 Charakteristische Zeitskalen des Klimageschehens .....	61
Abb. 23 Charakteristische biologische Zeitskalen.....	64
Abb. 24 Kulturelle Entwicklung des Entropieexports .....	71
Abb. 25 Illustration des „Metal-Aqua-Farmings“; Photosynthese-getriebene Anreicherung wertvoller Metalle aus dem Meer .....	89