

Reiner Kümmel
Dietmar Lindenberger
Niko Paech

Energie Entropie Kreativität

Was das Wirtschaftswachstum treibt
und bremst



Springer Spektrum

Energie, Entropie, Kreativität

Reiner Kümmel · Dietmar Lindenberger
Niko Paech

Energie, Entropie, Kreativität

Was das Wirtschaftswachstum treibt
und bremst

Reiner Kümmer
Institut für Theoretische Physik und
Astrophysik, Campus Süd
Universität Würzburg
Würzburg, Deutschland

Niko Paech
Fakultät III, Plurale Ökonomik
Universität Siegen
Siegen, Deutschland

Dietmar Lindenberger
Energiewirtschaftliches Institut (EWI)
Universität zu Köln
Köln, Deutschland

ISBN 978-3-662-57857-5 ISBN 978-3-662-57858-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-57858-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Lisa Edelhäuser

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Wer Großes will, muss sich zusammenraffen.
In der Beschränkung zeigt sich erst der Meister.
Und das Gesetz nur kann uns Freiheit geben.*

Johann Wolfgang von Goethe, 1802 [1]

Geleitwort

Es ist mir ein Vergnügen, den Lesern dieses Buch zu empfehlen, das von der Idee getrieben wird, die physikalischen Grenzen menschlichen Wirtschaftens mithilfe der Thermodynamik, einer der universellsten physikalischen Theorien die wir haben, auszuloten. Das Buch bleibt aber nicht dabei stehen, abstrakte Grenzen zu formulieren, es überschreitet selbst Grenzen. Es gibt Hinweise, wie aus unentrinnbaren physikalischen Gesetzmäßigkeiten Konsequenzen gezogen und Entscheidungsprozesse vorbereitet werden können, um gesellschaftliche Entwicklungen im Einklang mit einer zukunftsorientierten Ökonomie nach westlichen Maßstäben zu gestalten. Damit in die wissenschaftliche Öffentlichkeit zu treten, verlangt durchaus Mut.

Wirtschaft und Gesellschaft sind seit den späten 1970er-Jahren, in denen der Ursprung der von Kümmel, Lindenberger und Paech verfolgten Arbeiten liegt, enormen Veränderungen unterworfen. Der umstürzende Einfluss der Informationsgesellschaft – das wäre vielleicht eine eigene physikalische Betrachtung wert – und die einsetzende Globalisierung waren in ihrem Ausmaß noch nicht absehbar. Die rasante Entwicklung sieht man schon dem Inhaltsverzeichnis an, und Reiner Kümmel nimmt sich auch Fragestellungen an, die sich wie Energiewende und Migration nicht mehr im Vorhersage- sondern längst im Erprobungsstadium befinden.

„War’s das schon?“ für das Kapitel Thermodynamik und Ökonomie, oder Physik und Gesellschaft? Wohl kaum, die Herausforderungen für Wissenschaft und Gesellschaft bleiben, werden womöglich größer. Ich wünsche dem Buch – wobei ich mit Reiner Kümmels Ideen seit fast 40 Jahren vertraut bin – auch als einem persönlichen Zeitzeugnis aufmerksame Leser und Interesse an weitergehenden Fragestellungen.

März 2018

Dieter Meschede
Professor für Physik
Universität Bonn

Vorwort

Energie, Wirtschaftswachstum und Macht sowie Entropie, Emissionen und Beschränkung beherrschen den gegenwärtigen Umbruch in den durch Mobilität und Information miteinander verflochtenen Ländern der Welt. Die beiden Tripel verklammern Thermodynamik und Ökonomie.

Die Thermodynamik beschreibt physikalische Vielteilchensysteme unter der Wirkung von Energieumwandlung und Entropieproduktion. Entwickelt wurde sie zum Verständnis der Dampfmaschine und der ihr nachfolgenden Dampfturbinen, Gasturbinen, Ottomotoren und Dieselmotoren sowie zur Beherrschung der Prozesse, mit denen diese Wärmekraftmaschinen, im Verbund mit Öfen und Reaktoren, die gewaltigen, von der Sonne (und kosmischen Katastrophen) auf der Erde angelegten Energiespeicher Kohle, Öl, Gas (und Uran) in Energiedienstleistungen für den Menschen umwandeln.

Energieumwandlungsanlagen und Informationsprozessoren bilden das Herz des Kapitalstocks moderner industrieller Volkswirtschaften. Arbeitsleistung und Informationsverarbeitung, die das Bruttoinlandsprodukt oder Teile desselben erzeugen, unterliegen dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik von der Erhaltung der Energie und dem Zweiten Hauptsatz von der Zunahme der Entropie, sprich Unordnung. Doch nicht nur Hardware und das Grundgesetz des Universums, als die man die ersten zwei Hauptsätze der Thermodynamik auch bezeichnen kann, verbinden Thermodynamik und Ökonomie, sondern auch die Eigenschaft, dass sie beide Systemwissenschaften sind: Thermodynamik erforscht Systeme aus sehr vielen, über atomare Kräfte miteinander wechselwirkenden Teilchen, während Ökonomie das Verhalten ökonomischer Akteure untersucht, die auf Märkten über den preisgesteuerten Handel von Gütern und Dienstleistungen miteinander wechselwirken. Systemische Gemeinsamkeiten führen zur Verwendung ähnlicher mathematischer Methoden in der Thermodynamik und in der Theorie des Wirtschaftswachstums. Doch nicht das ist der Grund dafür, dass ich mich als theoretischer Physiker neben meinen Arbeitsgebieten Theorie der Supraleitung und Halbleitertheorie auch den Problemen von Energie und Wirtschaftswachstum sowie Energie-, Emissions- und Kostenoptimierung zugewandt habe. Vielmehr ist es die Wichtigkeit von Beschränkungen in Thermodynamik und Ökonomie.

Salopp formuliert sagt der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik: Immer wenn etwas passiert, wird Entropie produziert. Werden in physikalischen Systemen Beschränkungen aufgehoben, z. B. ihres Volumens oder des Energieaustauschs

mit der Umgebung, geraten sie aus dem Gleichgewicht, verändern sich, und es wird Entropie produziert. Bei der Verbrennung fossiler Energieträger gehört zur Entropieproduktion die Emission von Wärme und Teilchen. Hierdurch entstehen Umweltbelastungen verschiedener Schwere und Intensität, sofern nicht durch Beschränkungen wie Schadstoff-Rückhaltung und Entsorgung gegengesteuert wird. Die unvermeidlichen Wärmeemissionen werden dadurch allerdings noch gesteigert und können langfristig problematisch werden, wenn die Entropieentsorgung durch die Wärmeabstrahlung in den Weltraum mit der industriellen Entropieproduktion innerhalb der Biosphäre nicht mehr mithalten kann.

Somit legt der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik energiegetriebenem Wirtschaftswachstum innerhalb der Biosphäre Beschränkungen auf. Selbst wenn alle gesundheits- und klimaschädlichen Teilchenemissionen unterbunden werden, bleiben die klimaverändernden Wärmeemissionen und errichten die Hitzemauer.

In den demokratisch verfassten Industrieländern wird das Handeln der ökonomischen Akteure durch Rahmenbedingungen beschränkt, die der Gesetzgeber den Märkten auferlegt und deren Einhaltung er durch Institutionen wie Kartellämter, Finanz-, Sozial-, Gesundheits- und Umweltbehörden überwacht. Das vorliegende Buch plädiert dafür, diese Rahmenbedingungen zu präzisieren und zu verschärfen vor dem Hintergrund, dass Energie ein mächtiger Produktionsfaktor ist und ihre Nutzung naturgesetzlich verkoppelt ist mit Emissionen erzeugender Entropieproduktion.

Das Buch ist eine Fortschreibung meines ebenfalls bei Springer erschienenen Buchs *The Second Law of Economics – Energy, Entropy, and the Origins of Wealth*. Wie dieses Werk verwendet es Teile meiner Vorlesung „Thermodynamik und Ökonomie“, die ich zwischen 1990 und 2015 in der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Würzburg gehalten habe, sowie Ergebnisse der in begutachteten Fachzeitschriften publizierten Forschungen meiner Energiearbeitsgruppe. Das bedingt die beschränkte Stoffauswahl, die trotz der Horizonterweiterung durch Niko Paechs *Postwachstumsökonomik* in keiner Weise die Fülle der Literatur zu energiewirtschaftlichen und umweltökonomischen Fragen abdeckt.

Das Buch versucht, in den Kapiteln „Entropie und Umbruch“, „Energie und Leben“, „Postwachstumsökonomik“, „Länder im Umbruch“ und „Was werden wir wählen?“ mit wenigen Gleichungen auszukommen. Präzisere Beschreibungen von Sachverhalten, die Mathematik erfordern, stehen in Anhängen. Im zentralen dritten Kapitel, „Wirtschaftswachstum“, geht es um die quantitative Analyse industriellen Wirtschaftswachstums in Deutschland, Japan und den USA. Diese zeigt, dass Energie ein mächtiger Produktionsfaktor ist. Hier erscheint es geboten, die verwendeten mathematischen Methoden so weit darzustellen, dass man sehen kann, wo, wie und warum die geschilderte Theorie des Wirtschaftswachstums von der orthodoxen Theorie der Lehrbuchökonomie abweicht und dass der Knackpunkt in der Berücksichtigung von technologischen Beschränkungen liegt. Für Leser, die an mathematischen Argumentationen weniger interessiert sind, wird gesagt, was übersprungen werden kann. Auch wenn die Kapitel stellenweise aufeinander Bezug nehmen, können sie unabhängig voneinander gelesen werden.

Ich freue mich, dass ich als Ko-Autoren Dietmar Lindenberger und Niko Paech gewinnen konnte. Mit Dietmar Lindenberger verbinden mich 25 Jahre gemeinsamer energiewissenschaftlicher Forschungen, und Niko Paech beschreibt schonungslos-realistisch die Änderungen individueller und gesellschaftlicher Verhaltensweisen, die bei einer Beschränkung der Industrieproduktion auf die Biosphäre der Erde notwendig werden dürften.

Wie in *The Second Law of Economics* will und muss ich die Personen nennen, die nicht nur durch ihre Publikationen sondern auch durch intensive persönliche Kontakte mir geholfen haben, das Zusammenwirken von Thermodynamik und Ökonomie zu verstehen und über Lösungen der gesellschaftlichen Probleme nachzudenken, die aus der Zusammenschau dieser beiden Disziplinen erkennbar werden. Es sind dies der Sozialethiker Wilhelm Dreier (†), die Wirtschaftswissenschaftler Wolfgang Eichhorn, Alfred Gossner und Wolfgang Strassl, der Physiko-Chemiker und Energiewissenschaftler Willem van Gool (†), der Physiker und Visionär der Weltraumindustrialisierung Gerard K. O'Neill (†), der Mathematiker Jürgen Grahl sowie die Pioniere der Energie- und Umweltforschung Charles A. Hall und Robert U. Ayres. Vielfältige Anregungen habe ich auch empfangen durch Mitglieder der Studiengruppe Entwicklungsprobleme der Industriegesellschaft (STEIG e. V.) sowie Kollegen im Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) und im Fachverband sozio-ökonomische Systeme der DPG.

Dankbar bin ich dafür, dass trotz gegenläufiger publizistischer Bestrebungen die Einheit von Forschung und Lehre an den deutschen Universitäten bisher bewahrt worden ist. In den großen Kursvorlesungen sowie den zugehörigen Übungen und Praktika der Physik werden die inhaltlichen und methodischen Grundlagen des Fachs vermittelt. Wahlpflichtveranstaltungen und spezielle Kurse führen an die Front der Forschung, oft auf dem Gebiet des Lehrenden. Das hilft den Studierenden bei der Auswahl des Gebiets, auf dem sie ihre Prüfungsarbeiten der verschiedenen Studienabschlüsse machen. Diese sind mit selbständiger Forschung unter Anleitung eines Dozenten verbunden und führen oft zu Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften. Deren Ergebnisse fließen wieder in die passenden Lehrveranstaltungen ein. So beflügelt die Einheit von Forschung und Lehre den wissenschaftlichen Fortschritt.

Das Schöne dabei ist, dass junge Menschen mit wachem Geist sehr interessiert an Neuem sind. Sie scheuen auch nicht vor Risiken zurück, wie sie gerade interdisziplinäre Forschung mit sich bringt. Auf dem Gebiet der Thermodynamik und Ökonomie verdanke ich viel den folgenden Mitarbeitern in der Reihenfolge ihres Eintritts in meine Energiearbeitsgruppe: Klaus Walter, Bruno Handwerker, Helmuth-M. Groscurth, Uwe Schüssler, Thomas Bruckner, Dietmar Lindenberger, Volker Napp, Alexander Kunkel, Hubert Schwab, Julian Henn, Jörg Schmid, Robert Stresing und Tobias Winkler.

Meiner Frau Rita danke ich dafür, dass sie im Sommer 1968, nicht lange nachdem wir in die Nähe Frankfurts gezogen waren, sich in unserem bürgerlich-gemütlich eingerichteten Wohnzimmer umsah, fragte: „Und das war's dann?“, an die vor unserem

Wechsel nach Champaign-Urbana gehegten Pläne erinnerte und damit das Unternehmen anstieß, das uns nach Cali in Kolumbien führte. Dort begann ich zu verstehen, dass Thermodynamik wichtig ist für Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Würzburg
im März 2018

Reiner Kümmel

Inhaltsverzeichnis

1 Entropie und Umbruch	1
Reiner Kümmel	
1.1 Grundgesetz des Universums	1
1.1.1 Unordentliches Gleichgewicht	1
1.1.2 Entropieproduktion und Umweltbelastung	4
1.1.3 Der Zerberus vorm Schlaraffenland	16
1.2 Beschränkungen	18
1.2.1 Informationsströme	18
1.2.2 Kapitalströme	21
1.2.3 Märkte	24
2 Energie und Leben	27
Reiner Kümmel	
2.1 Fotosynthese und Atmung	28
2.2 Agrargesellschaft	29
2.3 Industriegesellschaft	32
2.3.1 Technischer Fortschritt, Energiesklaven und Emissionen ...	34
2.3.2 Schadstoff-Rückhaltung und Entsorgung	41
2.3.3 Rationelle Energieverwendung	47
3 Wirtschaftswachstum	57
Reiner Kümmel und Dietmar Lindenberger	
3.1 Volkswirtschaftslehre – orthodox	57
3.2 Ölpreisschocks	62
3.3 Wachstumstheorie	67
3.3.1 Kapital, Arbeit, Energie und Kreativität	67
3.3.2 Modellierung der Produktion	71
3.3.3 Produktionsmächtigkeiten	76
3.3.4 Neoklassik	80
3.3.5 Vom Gesetz des abnehmenden Ertragszuwachses zu LinEx-Funktionen	83
3.3.6 Die Macht der Energie und die Schwäche der Arbeit	89

3.4	Technologische Beschränkungen	91
3.4.1	Im blinden Fleck der Lehrbuchökonomie	93
3.4.2	Gewinnoptimierung	94
3.4.3	Bergab, entlang dem Wall	96
4	Postwachstumsökonomik	101
	Niko Paech	
4.1	Nachhaltigkeit und Wachstum	101
4.2	Die Überwindung der Nullsummenlogik als moderner Mythos	104
4.3	„Grünes“ Wachstum: Fortgesetzte Plünderung mit anderen Mitteln?	106
4.4	Wie fortschrittlich kann technischer Fortschritt sein?	107
4.5	Externe Effekte und Effizienz	109
4.6	Ökonomische Effizienz als Irrtum?	111
4.7	Rebound-Effekte	113
4.7.1	Entstehungsseite des BIP: Materielle Rebound-Effekte	114
4.7.2	Verwendungsseite des BIP: Finanzielle Rebound-Effekte	116
4.8	Postwachstumsökonomie	116
4.8.1	Fünf Wegmarken einer Transformation	117
4.8.2	Wachstumswänge reduzieren	119
4.8.3	Industrierversorgung und Subsistenz	121
4.8.4	Angebotskonfiguration	125
4.8.5	Angepasste Werkzeuge zur Senkung der Kapitalintensität	127
4.8.6	Stoffliche Nullsummenspiele	129
4.8.7	Wachstumsneutrale Geschäftsfelder	132
4.9	Fazit	134
5	Länder im Umbruch	137
	Reiner Kümmel	
5.1	Deutschland	139
5.1.1	Energiewende	140
5.1.2	Migration	155
5.2	Kolumbien	166
5.2.1	Amtliche Informationen	168
5.2.2	Herrliche Natur	169
5.2.3	Konservative gegen Liberale	170
5.2.4	Die Sprengkraft von Bevölkerungswachstum ohne Industrialisierung	175
5.2.5	Leidensdruck und Wandel	178

6 Was werden wir wählen?	183
Reiner Kümmel	
6.1 Umsteuern durch Energiesteuern	184
6.1.1 Besteuerung nach Leistungsfähigkeit	186
6.1.2 Grenzausgleichsabgaben	187
6.1.3 Energiesteuern in der Diskussion	188
6.2 Extraterrestrische Produktion	189
6.3 Ausblick	193
Anhänge	197
A.1 Entropie, Umwelt, Information	197
A.1.1 Entropieproduktion und Emissionen	197
A.1.2 Treibhauseffekte	198
A.1.3 Entropie und Information	201
A.2 Energie und Exergie	203
A.2.1 Energieeinheiten	203
A.2.2 Energiemenge und -qualität	204
A.3 Aggregation	207
A.3.1 Wertschöpfung	207
A.3.2 Kapital	209
A.3.3 Arbeit und Energie	211
A.4 Vergangenheit und Zukunft	212
A.4.1 Frühstadium der Industrialisierung	212
A.4.2 Wirtschaft total digital	213
Literatur	215
Sachverzeichnis	225

Über die Autoren

Reiner Kümmel Jg. 1939, ist Professor (i. R.) der theoretischen Physik. Seine Arbeitsgebiete sind die Theorie der Supraleitung, Halbleiterttheorie und Energiewissenschaft. Vor seiner Berufung an die Universität Würzburg in 1974 studierte/forschte/lehre er an der TH Darmstadt (Physikdiplom), der University of Illinois at Champaign-Urbana (Research Assitant von John Bardeen), der Universität Frankfurt/M. (Promotion und Habilitation) und der Universidad del Valle in Cali, Kolumbien. Von 1996 bis 1998 war er Vorsitzender des Arbeitskreises Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

PD Dr. Dietmar Lindenberger studierte Ökonomie und Physik in Stuttgart, Würzburg und Albany (USA), promovierte 1999 zu Fragen von Energie und Wirtschaftswachstum und habilitierte 2005 an der Universität zu Köln. Am dortigen Energiewirtschaftlichen Institut (EWI) ist er in Lehre, Forschung und Beratung tätig, u. a. für die EU-Kommission, das Bundeskanzleramt, Ministerien des Bundes und der Länder, nationale und internationale Energieunternehmen sowie Institutionen der Forschungsförderung. Er hat breit zu Energiefragen publiziert und ist u. a. federführender Autor der Energieszenarien für das Energiekonzept der Bundesregierung.

Apl. Prof. Dr. Niko Paech studierte Volkswirtschaftslehre, promovierte 1993, habilitierte sich 2005 und vertrat den Lehrstuhl für Produktion und Umwelt an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg von 2008 bis 2016. Derzeit forscht und lehrt er an der Universität Siegen im Masterstudiengang Plurale Ökonomik. Seine Forschungsschwerpunkte sind Postwachstumsökonomik, Klimaschutz, nachhaltiger Konsum, Sustainable Supply Chain Management, Nachhaltigkeitskommunikation und Innovationsmanagement. Er ist in diversen nachhaltigkeitsorientierten Forschungsprojekten, Netzwerken und Initiativen sowie im Aufsichtsrat zweier Genossenschaften tätig.

Reiner Kümmel

Das Gesetz von der stets wachsenden Entropie nimmt aus meiner Sicht den höchsten Rang unter allen Naturgesetzen ein. ...wenn sich herausstellt, dass eine Theorie dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik widerspricht, gibt es für sie keine Hoffnung, sondern nur den schmachvollen Zusammenbruch.

Sir Arthur Eddington, 1929. [2, S. 113].

Mit dem Fall der Berliner Mauer und des Eisernen Vorhangs zwischen November 1989 und Oktober 1990 erhoffte mancher „das Ende der Geschichte“ [3] und den Beginn eines Zeitalters der Freiheit für Menschen und Märkte. In dessen Frieden würde die Geschichte der Konflikte und Kämpfe ihr Ende finden. Inzwischen wissen wir, wie trügerisch diese Hoffnung war. Globale Wohlfahrt bedarf neuer Beschränkungen. Vielleicht nähert man sich dieser Einsicht am besten auf dem scheinbar beschwerlichsten Weg – dem entropischen. Schon das Wort „Entropie“ schreckt viele ab. Doch mit Entropie kann man die im Buch behandelten Entwicklungsprobleme der Industriegesellschaft besser verstehen als ohne sie. Versuchen wir es.

1.1 Grundgesetz des Universums

1.1.1 Unordentliches Gleichgewicht

„Entropie – kapiert I nie“, steht in der Denkblase über dem Kopf eines Physikers, der in ein Lehrbuch auf seinem Schreibtisch stiert. Ansonsten bedeckt den Schreibtisch ein wüstes Durcheinander aus Zetteln, Stiften, Schraubenzieher, Kabel, Akten, Streichholzschachtel, Kaffeetasche, Zeitschrift, Taschenrechner, Aschenbecher und Kleinteilen. Die Karikatur erläutert der Text: „Vielen Naturwissenschaftlern wird die Entropie nie so richtig vertraut“ [4]. Dabei hat sie unser Physiker vor Augen. Denn

Entropie ist das physikalische Maß für Unordnung.

Greift nun der grübelnde Denker hier einen Stift, dort einen Zettel und legt sie an anderen Orten wieder ab, hat sich der Gesamtzustand der Dinge zwar etwas, die allgemeine Unordnung aber überhaupt nicht verändert. Je größer der Tisch ist und je mehr Dinge auf ihm verteilt werden können, desto größer erscheint das Durcheinander. Denn entsprechend mehr Verteilungszustände gibt es, die alle den Eindruck erwecken, als hätte man ihre Einzelteile gerade aus einem Eimer auf den Tisch geschüttet. Natürlich hat solches der Physiker nicht getan. Aber bei der Anstrengung, in seinem Gehirn Ordnung in sein Verständnis von Entropie zu bringen, sind ihm die anfangs wohlgeordneten Gegenstände auf dem Tisch durcheinander geraten. Irgendwann muss auch wieder aufgeräumt werden. Das macht dann Arbeit.

Entsprechende Erfahrungen machen Eltern mit ihren Kindern. Solange diese klein sind und spielend ihre Vorstellungen von der Welt und deren Dingen im Kopf ordnen, verteilen sie ihre Spielsachen im Zimmer. Je mehr Spielsachen es gibt und je größer das Kinderzimmer ist, desto größer ist am Abend die Unordnung. Die Aufräumarbeit der Eltern sorgt dann dafür, dass die Kinder am nächsten Morgen die Spielsachen wieder an ihren gewohnten Plätzen in den Regalen finden. Auch Teenager scheinen noch das bei schulischem Lernen und entspannenden Pausen entstehende Durcheinander von Heften, Schreibgeräten, Taschenrechnern, Freundschaftsbändchen, Haarspangen, CDs, Schlüsseln, Postern und Zeitschriften zu genießen und schicken resignierten Eltern aus dem Ausland eine Ansichtskarte, auf der es genauso chaotisch aussieht wie in ihrem Zimmer, und darüber prangt der Text : „It’s my mess, and I love it.“

Physikalischer kann man den Zusammenhang zwischen Unordnung und Entropie anhand eines Systems nicht-wechselwirkender Teilchen in einem Kasten erläutern. Die Abb. 1.1 zeigt *einen* Zustand eines solchen Vielteilchensystems. Der Zustand eines jeden *Einzelteilchens* ist gekennzeichnet durch die Länge und Richtung des Impulspfeiles, der ihm anhaftet, und durch die Position der von ihm besetzten kleinen Zelle im Gesamtvolumen des Kastens. (Der Übersichtlichkeit halber sind nur Teilchen in den vordersten Zellen des Kastens eingezeichnet.) Wechselt auch nur ein Teilchen in eine andere Zelle, hat man schon einen anderen Vielteilchenzustand. Die Zahl der sich so ergebenden Vielteilchenzustände in dem Kasten, die so ungeordnet aussehen wie in der Abbildung, ist nun außerordentlich viel größer als die Zahl der *auch* möglichen Zustände, in denen z. B. alle Teilchen in den Zellen eines kleinen Raumbereichs geordnet sind. (Jeder dieser relativ seltenen Vielteilchenzustände entspricht einer möglichen Anordnung von Spielsachen in Kinderzimmerregalen).

Für die Abb. 1.1 wurde der Einfachheit halber ein Zustand vieler Teilchen gewählt, deren Wechselwirkungen untereinander vernachlässigbar klein sind. Doch die Begriffe und Gesetze der Thermodynamik, von denen im Weiteren die Rede sein wird, gelten auch, und gerade, für Systeme, in denen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen wichtig sind.

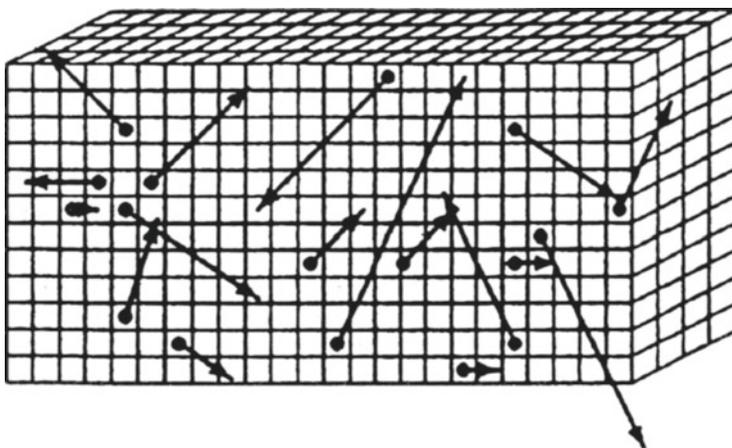


Abb. 1.1 Vielteilchenzustand eines idealen Gases in einem Kasten [5]

Alle Versuche von Naturwissenschaftlern, die Verteilung der Elementarteilchen, Atome und Moleküle sowie die daraus folgenden physikalischen, chemischen und technischen Prozesse zu beschreiben, gehen von der Annahme aus, dass ein System im *Gleichgewicht* jeden der ihm zugänglichen Vielteilchenzustände mit der gleichen Wahrscheinlichkeit einnimmt. Da es überwältigend mehr „unordentliche“ Zustände wie in Abb. 1.1 als geordnete Zustände innerhalb der Zahl Ω der einem System *insgesamt* zugänglichen Zustände gibt, muss die Unordnung in einem Gleichgewichtssystem mit dieser Zahl Ω zunehmen. Ludwig Boltzmann (1844–1906) hat gezeigt, dass diese Zunahme logarithmisch erfolgt, und dass die Zustandsfunktion Entropie S der Thermodynamik statistisch gegeben ist durch die (auf seinem Grabstein stehende) Gleichung

$$S = k_B \ln \Omega. \quad (1.1)$$

Dabei ist $k_B = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{Ws/K}$ die nach Boltzmann benannte Naturkonstante, und \ln ist der natürliche Logarithmus.

Für das Folgende ist von Bedeutung, dass der Gleichgewichtszustand eines Systems, und damit seine Entropie, festgelegt wird durch die *Beschränkungen*, denen das System unterworfen ist. In der Abb. 1.1 muss man sich die Beschränkungen hinzudenken. Das sind zum einen die Wände, die den Kasten begrenzen. Diese verhindern, dass sich die Teilchen aus dem abgebildeten Volumen hinausbewegen. Zum anderen sind es die thermischen Isolierungen dieser Wände, die verhindern, dass die Teilchen im Kasten mit der Umgebung des Kastens Energie in Form von Wärme austauschen, so dass sich ihre Impulspfeile ändern. Wärme ist eine *spezielle* Art von Energie, nämlich eine, die wie Arbeit, Systemgrenzen überschreitet. Allgemein gilt:

Energie ist die Fähigkeit, Veränderungen in der Welt zu bewirken. Gespeichert ist sie in Materie und Kraftfeldern.

Im thermodynamischen Gleichgewicht passiert nichts – außer Zufallsfluktuationen in der Teilchenverteilung. Ein Gleichgewichtssystem kennt keine Geschichte.¹ Erst wenn die das Gleichgewicht bestimmenden Beschränkungen aufgehoben werden, kommt es zu Ereignissen, beginnt „Geschichte“, zum Guten wie zum Schlechten. Zum Guten gehört Befreiung. Darum geht es im nächsten Kapitel. Zum Schlechten gehören Beeinträchtigungen der natürlichen Lebensgrundlagen und zwischenmenschlicher Beziehungen. Darum geht es im Weiteren hier.

1.1.2 Entropieproduktion und Umweltbelastung

Nehmen wir an, eine der Beschränkungen, die ein System im Gleichgewicht halten, werde aufgehoben. In unserem System der Abb. 1.1 würde z. B. das Kastenvolumen plötzlich vergrößert, indem man die Wände entfernt, die die Teilchen daran hinderten, sich in ein größeres Volumen auszubreiten. Oder man beseitigt die thermische Isolierung der Wände gegen die Außenwelt, so dass das Vielteilchensystem Wärme aufnimmt oder abgibt. In beiden Fällen gerät das System aus dem Gleichgewicht. Und dann wird Entropie produziert.

Die Erfahrungstatsache, dass Nichtgleichgewichtssysteme Entropie produzieren, ist Inhalt des (in der Gleichung (1.3) mathematisch formulierten) Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik.

Zusammen mit der Erfahrung der Energieerhaltung, dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik, bildet der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik das Grundgesetz des Universums.

Will man den ursprünglichen, ordentlicheren Systemzustand wieder herstellen, muss man die Beschränkungen wieder einführen. Das kann in unserem Beispiel dadurch geschehen, dass man die Teilchen mittels einer elektrisch betriebenen Pumpe in den Kasten, dessen Wände sich wieder an ihrem ursprünglichen Platz befinden, zurücksaugt, oder indem man ihnen mittels eines Kühlaggregats/Heizstabs die zuvor aufgenommene/abgegebene Wärme entzieht/zuführt und dann die thermische Isolierung aufs Neue anbringt. In allen Fällen muss zur Wiederherstellung der ursprünglichen Ordnung Energie aufgewendet werden. Die Erfahrung zeigt, dass dadurch im *Gesamtsystem* „Kasten + Umgebung einschließlich der Energielieferanten“ die Entropie weiter zunimmt.

¹So spekuliert man auch, dass ein abgeschlossenes Universum in einer fernen Zukunft den „Wärmetod“ erleiden würde, wenn es seinen Gleichgewichtszustand erreicht haben sollte. Dann wäre die Materie so gleichmäßig wie möglich auf alle ihre Orts- und Bewegungszustände verteilt und alle Strahlungsenergie hätte überall die gleiche Temperatur. Nichts könnte mehr geschehen. Aber wer weiß, ob das Universum abgeschlossen oder offen ist?

Prozesse, die nach der Aufhebung von Beschränkungen ablaufen und Entropie produzieren, nennt man „irreversibel“, weil die Welt nach ihrem Ablauf nicht mehr die gleiche ist wie vorher. Einzig Veränderungen, die unendlich langsam verliefen, könnten Entropieproduktion vermeiden. Doch solche Prozesse gibt es nicht im wahren Leben. Darum gilt (leider) jederzeit und überall der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik, der salopp auch so ausgesprochen werden kann:

Immer, wenn etwas passiert, wird Entropie produziert.

Er betrifft alle messbaren Erfahrungen mit Veränderungen in der Welt. Jeder Versuch, ihm zu entkommen, misslingt, und jede Theorie, die ihm widerspricht, ist sinnlos.

Entropieproduktion bei der Aufhebung von Beschränkungen begleitet die Evolution des Kosmos und des Lebens auf der Erde. Fortschritt, gerade auch in wirtschaftlichen Dingen, zielt auf die Aufhebung von Beschränkungen. Das erweitert Energienutzung und Entropieproduktion. Betrachten wir, wie sich das auf Umwelt und Ressourcen auswirkt.

Betrachten wir ein Industrieland, z. B. die Bundesrepublik Deutschland. Sie ist ein offenes thermodynamisches System, in dem die Nichtgleichgewichtsprozesse des Lebens und der maschinellen Wertschöpfung ablaufen. Sie empfängt Energie von der Sonne und strahlt Wärme in den Weltraum ab. Ihre Kraftwerke, Fabriken, Kraftfahrzeuge und Heizungsanlagen verbrennen Kohle, Öl und Gas, und bis zu ihrer endgültigen Abschaltung im Jahr 2022 wandeln auch noch einige Kernkraftwerke Materie in thermische und elektrische Energie um.² Güter und Dienstleistungen werden über die Landesgrenzen exportiert und importiert. Der Boden des Staatsgebiets beschränkt das System

Trotz des Nichtgleichgewichtszustands kann man die Entropieproduktion der technischen und wirtschaftlichen Prozesse mit – streng genommen nur in Gleichgewichtssystemen definierten – thermodynamischen Variablen wie Druck und Temperatur untersuchen. Dazu genügt es, dass in den vielen kleinen Raumzellen, in die man das System (gedanklich) unterteilt und die nach den Maßstäben unserer Alltagswelt nur winzig klein sind aber dennoch viele Milliarden Atome und Moleküle enthalten, *lokales* thermodynamisches Gleichgewicht herrscht. Das trifft dann zu, wenn während Zeitintervallen, in denen für uns feststellbare Veränderungen erfolgen, enorm viele „Stöße“ zwischen den Atomen und Molekülen einer jeden Zelle stattfinden. Dies ist in der Regel der Fall.

Für jeden Augenblick kann man die Entropiebilanz Deutschlands (oder irgendeines anderen Teils der Erde) aufstellen. Dazu denken wir uns die Landesgrenzen ins Dreidimensionale bis auf die Höhe gezogen, für die Rechte zum Überfliegen Deutschlands eingeholt werden müssen. Am oberen Rand hängen wir einen

²Dessen ungeachtet, und ungeachtet der Existenz von Elektroherden und -heizungen, erklärte eine Vizepräsidentin des Deutschen Bundestags im Frühjahr 2015 anlässlich eines Vortrags in Würzburg: „Mit Kernenergie kann man keine Räume wärmen, meine Damen und Herren!“.

immateriellen Schleier auf, der bis zum Boden reicht, und setzen einen immateriellen Deckel drauf. Die Entropiebilanz dieses so definierten Volumen Deutschlands, V , lautet dann: Die Änderung pro Zeiteinheit der Gesamtentropie im Volumem Deutschlands, $\frac{dS}{dt}$, ist gleich der Entropie, die pro Einheit der Zeit t mit der Außenwelt ausgetauscht wird, $\frac{d_a S}{dt}$, plus der Entropie $\frac{d_i S}{dt}$, die pro Zeiteinheit im Inneren des Volumens produziert wird:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{d_a S}{dt} + \frac{d_i S}{dt}. \quad (1.2)$$

Diese Entropiebilanzgleichung entspricht genau der Bilanzgleichung eines Sparkassenkontos: Die Änderung der Geldmenge auf dem Konto – sie entspricht $\frac{dS}{dt}$ – ist gegeben durch alle Einzahlungen und Auszahlungen – $\frac{d_a S}{dt}$ entsprechend – plus die im Konto produzierten Zinsen, die $\frac{d_i S}{dt}$ entsprechen.

Doch ein wichtiger Unterschied existiert zwischen Kontobilanz und Entropiebilanz. Die im Konto produzierten Zinsen können positiv sein, nämlich Guthabenzinsen, oder negativ, nämlich Überziehungszinsen. Doch die pro Zeiteinheit durch Nichtgleichgewichtsprozesse in einem System produzierte Entropie ist immer positiv:

$$\frac{d_i S}{dt} > 0. \quad (1.3)$$

Diese mathematische Formulierung des Zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik beruht ausschließlich auf der *Erfahrung*, die oben schon in Worten ausgesagt war.³

Die Bedeutung des Zweiten Hauptsatzes für die Umwelt wird erkennbar, wenn die Gl. (1.3) mittels der in Nichtgleichgewichtssystemen gültigen Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie aufgeschlüsselt wird. Das geschieht im Anhang A.1.1. Das Ergebnis, die Gl. (A.4), sagt:

Entropieproduktion ist verbunden mit Emissionen von Wärme und Teilchen.

Diese Emissionen führen das Gebot des Zweiten Hauptsatzes aus, Energie und Materie so gleichförmig wie möglich im System zu verteilen. Im industrialisierten Planeten Erde besorgen das die Wärme- und Stoffströme, die den Öfen, Wärmekraftmaschinen und Reaktoren der Energieumwandlungsanlagen entweichen. Diese Emissionen ändern die Energieflüsse und die chemische Zusammensetzung der Biosphäre, an die sich die Lebewesen und ihre Populationen im Laufe der Evolution (mehr oder weniger) optimal angepasst hatten. Sind diese Veränderungen so stark, dass sie nicht durch die von der Sonne und der Wärmeabstrahlung in den Weltraum angetriebenen physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse rückgängig gemacht werden können, und erfolgen sie so schnell, dass gesundheitliche und soziale Anpassungsdefizite der pflanzlichen, tierischen und menschlichen Individuen

³Der Zweite Hauptsatz kann nicht mathematisch widerlegt werden, selbst wenn ein promovierter Physiker aus einem angesehenen Forschungsinstitut auf einer internationalen Energiekonferenz in Usedom Anfang der 1990er-Jahre behauptete, solches sei ihm gelungen und das später auch im Fernsehen eines EU-Landes wiederholte.

und ihrer Gesellschaften entstehen, werden die Emissionen als Umweltverschmutzung empfunden.

Luftverschmutzung und Emissionsquellen

Die Tab. 1.1 zeigt die wichtigsten luftverschmutzenden Substanzen und die Energieträger, bei deren Nutzung sie emittiert werden. Es sind Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x), Feinstaub, Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (C_mH_n) und ionisierende Strahlung/radioaktive Partikel (Radioaktiv). Die nicht aufgeführte Erdwärme ist besonders mit H_2S Emissionen verbunden, wenn sie aus von Magma erhitzten Quellen stammt.

Die Nutzung *sämtlicher* aufgeführter Energieträger führt auch zu Emissionen von Treibhausgasen. Dazu gehören Kohlendioxid (CO_2) und Ozon (O_3), die bei der Verbrennung von Kohle, Öl, und Erdgas und den daraus erzeugten Produkten entstehen, ferner Methan (CH_4) aus dem Kohleabbau sowie der Förderung und Verteilung von Erdgas. Die Treibhausgasemissionen von Uran, sowie Sonne, Wind und Wasser beruhen auf den in Tab. 1.2 angegebenen Lebenszyklus- CO_2 -Emissionen, die bei der Produktion von Kernkraftwerken, Solarzellen, Sonnenkollektoren, Bewehrungen, Windturbinen und Staudämmen unter Verwendung fossiler Energieträger entstehen; die Verrottung der Vegetation in waldüberflutenden Stauseen von Wasserkraftwerken setzt ebenfalls CO_2 frei.

Bei der Erzeugung von Biomasse kommt es zur Emission von Stickoxiden (N_2O), wenn stickstoffhaltiger Kunstdünger verwendet wird, und zu CO_2 -Emissionen bei Unterstützung durch ölabhängige Agrartechnik; ohne Rekultivierungsmaßnahmen addieren sich dazu die Emissionen der Biomasseverbrennung. In Deutschland werden inzwischen sehr viele Biogasanlagen betrieben – Biomasse insgesamt steuerte 2016 etwa zwei Drittel zum 12 %-Beitrag aller erneuerbaren Energien zur Deckung des deutschen Primärenergiebedarfs bei. Es häufen sich Unfälle und Leckagen, bei denen Methan in die Atmosphäre entweicht. Das Treibhauspotenzial eines Methanmoleküls ist das 25-Fache eines CO_2 -Moleküls [6, S. 348].

Tab. 1.1 Emissionen aus Energieträgern, ohne Treibhausgase

Energieträger	SO_2	NO_x	Staub	CO	C_mH_n	Radioaktiv
Kohle	X	X	X	X	X	X
Öl	X	X	X	X	X	
Erdgas		X		X		
Uran						X
Sonne, Wind						
Wasser						
Biomasse	X	X	X	X	X	

Tab. 1.2 Gesamte, spezifische Lebenszyklus-CO₂-Emissionen der Elektroenergie für verschiedene Energiesysteme, in Gramm pro kWh. Enthalten sind darin die Emissionen aus Bau, Betrieb und Wartung der Systeme [7–9]

Braunkohlekraftwerk	850–1200
Steinkohlekraftwerk	700–1000
Gaskraftwerk	400–550
Solarzellen	70–150
Wasserkraftwerk	10–40
Kernkraftwerk	10–30
Windpark	10–20

Die Abschätzung der Lebenszyklus-CO₂-Emissionen von Solarzellen in Tab. 1.2 berücksichtigt, dass im Jahr 2014 Solarzellen aus chinesischer Produktion etwa zwei Drittel des Weltmarkts erobert hatten und dass die CO₂-Emissionen aus der chinesischen Solarzellenproduktion etwa doppelt so hoch sind wie die aus der deutschen [9].

Schadenswirkungen von Emissionen

Die unmittelbaren Schadenspotenziale der in Tab. 1.1 aufgeführten Emissionen sind seit langem bekannt. Tab. 1.3 gibt sie an. Schwefel- und Stickoxide sind Reizgase, die den Widerstand der Atemwege erhöhen. SO₂ verursacht Bronchokonstriktionen, und NO_x verringert den arteriellen Partialdruck von O₂. In Tierversuchen mit Stickoxiden (NO_x) stellte man destruktive Prozesse an den Oberflächenzellen der Lungenbläschen und des Bronchialsystems sowie eine Beeinflussung der Abwehrkraft der Lungen gegenüber pathogenen Keimen fest. Das in Tab. 1.3 nicht aufgeführte Kohlenmonoxid (CO) entsteht bei unvollständiger Verbrennung und behindert den Sauerstofftransport im Blut. Lungengängiger Feinstaub mit einer Korngröße bis zu 10 μm, der etwa 85 % aller Staubemissionen ausmacht, dürfte auch schon in geringen Konzentrationen ein wesentlicher Faktor bronchopulmonaler Erkrankungen

Tab. 1.3 Emissionen aus Energieumwandlung und ihre Schadenswirkungen (ohne CO, beschrieben im Text, C_mH_n, radioaktive Substanzen und Treibhausgase)

Substanz	SO ₂	NO _x	Staub
Ursprung	S-Inhalt	N-Inhalt	Flugasche, Verkehr
	von Kohle und Öl		
		Hohe Verbrennungstemperatur	
Umwandlung	H ₂ SO ₃	HNO ₂	
	H ₂ SO ₄	HNO ₃	
Wirkung auf den Menschen	Herz, Kreislauf	reduzierte Diffusion von CO	
	Erkrankungen der Atemwege		
Ökosysteme	Waldschäden		
Gebäude	Korrosion		

sein. Bei den Londoner Smogkatastrophen in den Jahren 1948 und 1952 starben insgesamt über 4000 Menschen mehr als normalerweise erwartet an Lungenentzündung, Herzinsuffizienz und koronaren Herzerkrankungen. Das löste entschiedene Maßnahmen gegen Luftverschmutzung aus, die zumindest in den hoch industrialisierten Ländern derartige Smogkatastrophen unterbunden haben. Doch Bau und Betrieb der Staubfilter, sowie der Entstickungs- und Entschwefelungsanlagen, die die Ströme der gefährlichen Partikel und Moleküle in (heute noch) harmlose Wärmeströme umwandeln, erfordern Energie und Kapital. Schwellen- und Entwicklungsländer, die die Mittel dafür nicht aufbringen können oder wollen, leiden mit wachsender Industrialisierung immer stärker unter den Folgen der Luftverschmutzung.

In den 1970er- und 1980er-Jahren wurde die deutsche Öffentlichkeit durch eine dramatische Zunahme der Waldschäden alarmiert, die zu einem erheblichen Teil vom sauren Regen angerichtet wurden, den die SO_2 - und NO_x -Emissionen aus deutschen Großfeuerungsanlagen verursacht hatten („Waldsterben“). In der Mitte der 1980er-Jahre waren dann das Umweltbewusstsein und der Wohlstand in Deutschland so weit gediehen, dass es politisch möglich wurde, durch die Großfeuerungsanlagen-Verordnung gesetzliche Emissionsgrenzwerte für SO_2 und NO_x einzuführen. Sie gelten für Kraftwerke ab einer thermischen Leistung von mehr als 300 MW_{th} . Danach darf z. B. ein Steinkohlekraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 750 MW_{el} jährlich nicht mehr als 6200 t SO_2 und 4100 t NO_2 (NO_x , gerechnet als NO_2), emittieren. Tatsächlich wurden die Kraftwerke viel besser. Ihre SO_2 - und NO_x (NO_2)-Emissionen nahmen in (West-) Deutschland von 2 und 1 Mio. t in 1980 auf 0,3 und 0,5 Mio. t in 1989 ab.

Das zeigt, was Ingenieurskunst und Industrie leisten können, wenn sie müssen. Es liefert auch ein gutes Beispiel für die wohlthätige Wirkung neuer Beschränkungen unter dem Druck des Zweiten Hauptsatzes. Allerdings haben wir Deutsche uns trotz aller Bekenntnisse zu Umwelt- und Klimaschutz noch nicht dazu durchringen können, wie alle anderen zivilisierten Länder der Welt eine durchgängige Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen einzuführen, sagen wir 130 km/h , was die Emissionen von CO_2 , NO_x und Feinstaub im Verkehrssektor deutlich senken würde.

Anthropogener Treibhauseffekt

Ein drängendes Problem globaler Umweltveränderungen ist die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch Emissionen von Treibhausgasen. Das führt zur Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde und Klimaveränderungen. Für Leser, die sich noch für einige Einzelheiten zum Treibhauseffekt und zu seiner Verstärkung durch Emissionen aus menschlichen Aktivitäten interessieren, wird die Wirkung der Treibhausgase in der Atmosphäre etwas genauer im Anhang A.1.2 beschrieben. Eine ausführlichere Darstellung findet sich z. B. in [6] oder in den Kapiteln über Energie und Entropie von [2].

Die Enzyklika *Laudato Si* [10] von Papst Franziskus aus dem Jahr 2015 mahnt die Menschheit in bewegenden Worten zu einem sorgsamem Umgang mit den Gütern unseres gemeinsamen Hauses, der Biosphäre unserer Erde. Selbst bei Atheisten stieß sie auf positive Resonanz, wie in Gesprächen am Rande einer internationalen Energiekonferenz festzustellen war. Einerseits ist es gut, wenn Religion und Wissenschaft

aufeinander zugehen, andererseits enthält die Enzyklika in ihren Punkten 23 und 106 Passagen, die zeigen, welche Schwierigkeiten das Verständnis physikalischer und ökonomischer Sachverhalte den Vertretern von Disziplinen und Institutionen bereitet, die den Menschen sagen wollen, was gut und richtig ist.

Im Punkt 23 der Enzyklika heißt es zum anthropogenen Treibhauseffekt (Fettschrift-Hervorhebung von R.K.):

Das Klima ist ein gemeinschaftliches Gut von allen und für alle. ... zahlreiche wissenschaftliche Studien zeigen, dass der größte Teil der globalen Erwärmung der letzten Jahrzehnte auf die starke Konzentration von Treibhausgasen (Kohlendioxid, Methan, Stickstoffoxide und andere) zurückzuführen ist, die vor allem aufgrund des menschlichen Handelns ausgestoßen werden. *Wenn sie sich in der Atmosphäre intensivieren, verhindern sie, dass die von der Erde reflektierte Wärme der Sonnenstrahlen sich im Weltraum verliert ...*

Kommentar: Also würden wir alle irgendwann in der aufgestauten Wärme verdampfen. Richtig wäre: „Wenn sie sich in der Atmosphäre intensivieren, kann die durch die Sonnenstrahlen empfangene Wärme nur bei steigender Oberflächentemperatur der Erde in den Weltraum zurückgestrahlt werden.“

Nun mag man diesen Kommentar noch als Beckmesserei eines Physikers abtun. Doch das negative Urteil der Enzyklika unter Punkt 106 über Technik und Industriegesellschaft (Fettschrift-Hervorhebung von R.K.) geht an die Substanz der modernen Produktion materiellen Wohlstands:

106. DIE GLOBALISIERUNG DES TECHNOKRATISCHEN PARADIGMAS. Das Grundproblem ist ... wie die Menschheit tatsächlich die Technologie und ihre Entwicklung zusammen mit einem homogenen und eindimensionalen Paradigma angenommen hat. Nach diesem Paradigma tritt eine Auffassung des Subjekts hervor, das im Verlauf des logisch-rationalen Prozesses das außen liegende Objekt allmählich umfasst und es so besitzt. Dieses Subjekt entfaltet sich, indem es die wissenschaftliche Methode mit ihren Versuchen aufstellt, die schon explizit eine Technik des Besitzens, des Beherrschens und des Umgestaltens ist. Es ist, als ob das Subjekt sich dem Formlosen gegenüber befände, das seiner Manipulation völlig zur Verfügung steht. **Es kam schon immer vor, dass der Mensch in die Natur eingegriffen hat. Aber für lange Zeit lag das Merkmal darin, zu begleiten, sich den von den Dingen selbst angebotenen Möglichkeiten zu fügen. Es ging darum, zu empfangen, was die Wirklichkeit der Natur von sich aus anbietet, gleichsam die Hand reichend. Jetzt hingegen ist das Interesse darauf ausgerichtet, alles, was irgend möglich ist, aus den Dingen zu gewinnen durch den Eingriff des Menschen, der dazu neigt, die Wirklichkeit dessen, was er vor sich hat, zu ignorieren oder zu vergessen. Deswegen haben der Mensch und die Dinge aufgehört, sich freundschaftlich die Hand zu reichen, und sind dazu übergegangen, feindselig einander gegenüber zu stehen.**

Kommentar: Romantisierender, unrealistischer Blick auf die Agrargesellschaft und Verkennung der Chancen und Risiken der Industriegesellschaft. Wie in der Agrargesellschaft „der Mensch und die Dinge ... sich freundschaftlich die Hand ... reich(t)en“ kann man im Alten Testament nachlesen, z. B. in 3 Könige 5, 27–32; 12, 1–17. Näherliegende Beispiele sind der Bau des Petersdoms, die Inbesitznahme der Amerikas durch die europäischen Eroberer und Waldvernichtung durch Rodungen zur Gewinnung von Ackerland sowie durch Holzeinschlag zur Gewinnung von Energie und