

---

# 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

<b>1 Entropie und Umbruch</b> .....	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
<b>2 Energie und Leben</b> .....	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
<b>3 Wirtschaftswachstum</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Postwachstumsökonomik . . . . .</b>	<b>101</b>
	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
<b>5</b>	<b>Länder im Umbruch . . . . .</b>	<b>137</b>
	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

---

<b>6 Was werden wir wählen?</b> .....	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
<b>Anhänge</b> .....	197
<b>A.1 Entropie, Umwelt, Information</b> .....	197
<b>A.1.1 Entropieproduktion und Emissionen</b> .....	197
<b>A.1.2 Treibhauseffekte</b> .....	198
<b>A.1.3 Entropie und Information</b> .....	201
<b>A.2 Energie und Exergie</b> .....	203
<b>A.2.1 Energieeinheiten</b> .....	203
<b>A.2.2 Energiemenge und -qualität</b> .....	204
<b>A.3 Aggregation</b> .....	207
<b>A.3.1 Wertschöpfung</b> .....	207
<b>A.3.2 Kapital</b> .....	209
<b>A.3.3 Arbeit und Energie</b> .....	211
<b>A.4 Vergangenheit und Zukunft</b> .....	212
<b>A.4.1 Frühstadium der Industrialisierung</b> .....	212
<b>A.4.2 Wirtschaft total digital</b> .....	213
<b>Literatur</b> .....	215
<b>Sachverzeichnis</b> .....	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.