

Helmut Satz

Mehr als die Summe der Teile

Komplexität
in der Natur

SACHBUCH



Springer

Mehr als die Summe der Teile

Helmut Satz

Mehr als die Summe der Teile

Komplexität in der Natur

 Springer

Helmut Satz
Fakultät für Physik
Universität Bielefeld
Bielefeld, Nordrhein-Westfalen,
Deutschland

ISBN 978-3-662-67837-4 ISBN 978-3-662-67838-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67838-1>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Übersetzung der englischen Ausgabe: „More than the Sum of the Parts“ von Helmut Satz, © Helmut Satz 2022. Veröffentlicht durch Oxford University Press. Alle Rechte vorbehalten.

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Planung/Lektorat: Caroline Strunz
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberg Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

*Was aus vielen Bestandteilen zu einem einheitlichen
Ganzen zusammengesetzt ist, das bildet offenbar mehr nur
als die Summe seiner Bestandteile.*

Aristoteles (384-322 v. Chr.), Metaphysik VII 17, 1041b

Vorwort

Ein Großteil der Naturwissenschaften beruht auf der Annahme, dass das Ganze die Summe seiner Teile ist. Diese Annahme hat sich in der Tat als außerordentlich erfolgreich erwiesen und uns wissenschaftliche Erkenntnisse geliefert, die heute die Grundlagen für das Verständnis unserer modernen Welt bilden. In letzter Zeit ist es jedoch immer offensichtlicher geworden, dass es eine sehr große Anzahl von Phänomenen und Vorgängen gibt, für die eine solche Annahme nicht zutreffend ist. Lange Zeit konnte man getrost voraussetzen, dass der betrachtete Zustand eines Vielteilchensystems, etwa eines Gases, im thermischen Gleichgewicht ist oder dass die Bewegung eines dynamischen Vorgangs reibungsfrei abläuft. Inzwischen haben wir jedoch festgestellt, dass die Vielzahl der auf diese Weise vernachlässigten oder ausgeschlossenen Vorgänge ein neues Forschungsgebiet ergibt: Komplexität – ein Gebiet, das sicherlich so umfangreich ist wie unsere

traditionelle Naturwissenschaft, obwohl noch nicht annähernd so weit entwickelt.

Dazu kommt, dass sich die Struktur komplexer Systeme als erstaunlich universell erweist: Man findet Komplexität in einer Vielzahl von sehr verschiedenen Phänomenen in der Natur. In vielen Bereichen der traditionellen Physik gibt es Begriffe, die speziell nur dort eine Bedeutung haben. Im Gegensatz dazu findet man Formen von kollektivem Verhalten, ausgelöst durch eine Verbindung von beliebig entfernten Konstituenten, nicht nur in der Quantenphysik, sondern genauso in der Kosmologie des frühen Universums oder dem Entstehen von Vogelschwärmen. Zudem führen die Entwicklung in der Wirtschaft, fluktuierende Börsenkurse, Bevölkerungszuwachs, die Ausbreitung von Epidemien und vieles mehr auf ganz ähnliche Strukturen.

Es ist daher kaum überraschend, dass sich daraus eine *Komplexitätstheorie* als neues Forschungsgebiet entwickelt hat, mit grundlegend neuen Begriffen wie beispielsweise Emergenz, Selbstorganisation und Bifurkation. Dieses Buch soll keine systematische Einführung in diese Komplexitätstheorie sein – dafür verweisen wir in den Literaturangaben auf etliche hervorragende Werke –, sondern vielmehr verschiedene Vorgänge und Strukturen in der physikalischen Welt vorstellen, die nicht in den Rahmen der traditionellen Wissenschaft passen, und zeigen, dass das meist auf neuen, kollektiven Wechselwirkungen von vielen Konstituenten beruht. In einigen Fällen kann man das Verhalten im Rahmen einer entstehenden Komplexitätstheorie erklären, in anderen (noch) nicht. Unser Ziel ist mehr eine Beschreibung, eine Darstellung von Phänomenen als die Suche nach einer Theorie. Das vielfältige Abbild, das diese verschiedenen Phänomene darstellen, kann ja vielleicht als Herausforderung

an zukünftige Wissenschaftler dienen, als Ansporn für ihre Suche nach einer umfassenderen und vollständigeren Komplexitätstheorie.

Wir werden uns in diesem Buch auf Phänomene beschränken, die in der Natur vorkommen und somit ein Thema für die Naturwissenschaft bilden. Themen aus Soziologie, Wirtschaft oder Politik werden nicht behandelt, auch wenn sie oft auf Abläufe führen, die denen in der Physik durchaus ähnlich sind, und obwohl Mathematiker und Physiker sehr wesentliche Beiträge zum Verständnis und zur weiteren Entwicklung einer durchaus allgemeinen Komplexitätstheorie geliefert haben. Entscheidende Aspekte des Themas – kritisches Verhalten (Kenneth Wilson), das Einsetzen von Chaos (Mitchell Feigenbaum) und Selbstorganisation (Per Bak) – wurden von Physikern eingeführt, und so ist es vielleicht nicht überheblich, wenn ein Physiker sein Abbild vom derzeitigen Stand des Gebiets vorlegt.

Die Entwicklung der Physik ist natürlicherweise verbunden mit den Namen derer, die die wesentlichen Begriffe und Vorstellungen eingeführt haben – Galileo, Newton, Maxwell, Boltzmann, Planck, Einstein und weitere. Die neuen Paradigmen in der Untersuchung komplexer Systeme haben noch nicht dazu geführt, dass ihre Erfinder in der allgemeinen Öffentlichkeit bekannt sind. Wenn wir hier aufzeigen wollen, wie diese Untersuchungen unsere Denkweise verändert haben, scheint es daher sinnvoll, die Wissenschaftler zu erwähnen, die diese Änderungen ausgelöst haben. Meine private Liste beginnt mit den drei oben erwähnten Namen: Kenneth Wilson, Mitchell Feigenbaum und Per Bak; die Liste setzt sich natürlich mit vielen weiteren fort. Diese drei haben aber den Weg gezeigt, dem wir jetzt folgen, und obwohl alle drei nicht mehr unter uns weilen, habe ich sie alle persönlich

gekannt. In gewisser Weise ist dieses Buch somit ein später Dank an sie.

Das Buch richtet sich an eine allgemeine Leserschaft, die interessiert ist an den neuen Perspektiven, die sich öffnen durch die Erforschung von Systemen aus vielen gleichen oder ähnlichen Konstituenten. Es soll, wie gesagt, kein Lehrbuch sein, sondern darstellen, dass in einer Vielzahl von Systemen die kollektive Wechselwirkung unter den vielen Konstituenten ganz neue und unerwartete Verhaltensweisen hervorruft: dass das Ganze eben mehr ist als nur die Summe der Teile.

Literaturhinweise für das spezielle Thema des jeweiligen Kapitels werden an dessen Ende angeführt. Am Schluss des Buches stelle ich dann nochmals eine Liste von Werken auf, die das Thema sowohl im Einzelnen als auch im Ganzen behandeln. Insbesondere gebe ich dort einige Bücher an, die das gerade neu entstehende Gebiet der Komplexitätstheorie zusammenfassend darstellen.

Eine englische Fassung dieses Buches ist 2022 bei Oxford University Press unter dem Titel *More than the Sum of the Parts* erschienen. Von dieser Fassung ist inzwischen (2023) auch eine italienische Übersetzung erschienen, *Più della Somma delle Parti*, im Verlag FrancoAngeli, Mailand. In der vorliegenden deutschen Fassung sind einige Erweiterungen dazugekommen.

Ich hatte die willkommene Gelegenheit, verschiedene Aspekte des Themas mit einigen Kollegen zu besprechen, und ich bin daher Andrzej Bialas (Krakau), Philippe Blanchard (Bielefeld), Paolo Castorina (Catania) und Frithjof Karsch (Bielefeld) sehr dankbar für anregende Bemerkungen. Shaun Bullett (London) und Bob Doyle

(Harvard) danke ich für hilfreiche Beiträge. Unserer Sekretärin, Susette von Reder, danke ich herzlich für ihre Hilfe in der Erstellung dieses Manuskripts.

Bielefeld
Mai 2023

Helmut Satz

Inhaltsverzeichnis

1	Teilen und Zusammenfügen	1
2	Der Gang der Zeit	15
3	Globale Verbindungen	25
4	Die Natur der Kräfte	33
5	Das Entstehen von Struktur	53
6	Die Raumenergie	63
7	Kritisches Verhalten	81
8	Selbstorganisierte Kritikalität	99
9	Fraktale Dimensionen	107
10	Verzweigung und Chaos	115
11	Die Brown'sche Bewegung	131
12	Strömung, Wirbel und Turbulenz	143

XIV	Inhaltsverzeichnis	
13	Plötzlich und unerwartet	157
14	Wörter und Zahlen	165
15	Schwärme	173
16	Quantenkomplexität	181
17	Schlusswort	195
	Literatur	199
	Personenverzeichnis	203
	Sachverzeichnis	207

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Joule'sches Experiment	17
Abb. 2.2	Neun Kugeln in neun Fächern und eine der 48.620 möglichen Anordnungen von neun Kugeln in 18 Fächern	18
Abb. 2.3	Grab von Ludwig Boltzmann in Wien mit der Entropiedefinition. (Photo: Zentralbibliothek für Physik, Wien, Österreich)	19
Abb. 2.4	Entropieverlauf im Joule'schen Experiment	21
Abb. 2.5	Layzers Vorstellung der Entwicklung des Universums	22
Abb. 2.6	David Layzer (1925–2019)	23
Abb. 3.1	a Anfängliche Münzverteilung, b Relative Haufengröße g als Funktion der Münzdichte n	26
Abb. 3.2	a Die zusätzliche rote Münze erzeugt eine Landverbindung und löst somit Perkolation aus. b Zustand oberhalb des Perkolationsspunkts	27

XVI **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 3.3	a Relative Haufengröße g als Funktion der Münzdichte n . b Anstiegsrate x der Haufengröße als Funktion der Münzdichte n	29
Abb. 3.4	Gitterbelegung bei geringer Dichte (a) und bei Perkolation (b)	30
Abb. 3.5	Zeitliche Entwicklung eines Brandes in einem lichten Wald	31
Abb. 4.1	Kepler'sche Regel für das Sonnensystem	40
Abb. 4.2	Umlaufgeschwindigkeiten von Sternen in einer Galaxie	41
Abb. 5.1	Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (Planck Detektor)	58
Abb. 5.2	Auswirkung von Schwerkraft auf eine willkürliche Verteilung	59
Abb. 5.3	Entstehung einer Galaxie durch Kollision zweier Gaswolken	60
Abb. 6.1	Ameise auf dem Ballon	69
Abb. 6.2	Rezessionsgeschwindigkeit vs. Entfernung für ferne Galaxien (Hubble)	71
Abb. 7.1	Sierpinski-Dreieck	86
Abb. 7.2	Ising-Modell	87
Abb. 7.3	Magnetisierung $m(T)$ im Ising-Modell als Funktion der Temperatur T	89
Abb. 7.4	Der Übergang von Nukleonmaterie bei niedriger Dichte (links) in Quarkmaterie bei hoher Dichte (rechts)	96
Abb. 7.5	Einige Teilnehmer der 1986 Konferenz über Gitter-QCD am Brookhaven National Laboratory. Von links nach rechts: sitzend Claudio Rebbi und Ken Wilson, stehend Michael Creutz, Sid Kahana (Leiter der BNL-Kerntheorie) und der Autor	96

Abb. 8.1	Anzahl von Erdbeben pro Jahr als Funktion ihrer Stärke auf der Richter-Skala, in der Region New Madrid, Missouri, USA	103
Abb. 8.2	Slip-Stick-Modell zur Entstehung von Erdbeben	104
Abb. 9.1	Dimensionalität und Skalenverhalten	109
Abb. 9.2	Fortlaufende Schritte in der Entstehung der Koch-Kurve	111
Abb. 9.3	Drei verschiedene Besetzungen für ein 3×3 -Gitter	112
Abb. 9.4	Der Umkippprozess für 35 Teilchen im mittleren Kasten (a). Die Form in b entspräche einem kegelförmigen Haufen, der aber nie erreicht wird. Das tatsächliche Endergebnis ist die fraktale Form in c	113
Abb. 9.5	Eine Million Sandkörner (L. Levine, W. Pegden und C. K. Smart, arXiv:1309.3267 (2013))	114
Abb. 10.1	Jährliche Entwicklung der relativen Bevölkerungsdichte x_n für Fruchtbarkeitsraten $k=0.75$ und $k=2.75$	120
Abb. 10.2	Jährliche Entwicklung der relativen Bevölkerungsdichte x_n für Fruchtbarkeitsrate $k=3.2$	121
Abb. 10.3	Jährliche Entwicklung der relativen Bevölkerungsdichte x_n für Fruchtbarkeitsrate $k=3.5$	122
Abb. 10.4	Einsetzen des Verzweigungsverhaltens	123
Abb. 10.5	Der Anfang von Fibonacci's Kaninchenrevolution	126
Abb. 10.6	Goldener Schnitt	127
Abb. 10.7	Erbfolge einer männlichen Biene	129

XVIII **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 10.8	Kachelabdeckung der Ebene nach Fibonacci	129
Abb. 12.1	Die große Welle vor Kanagawa. (Hokusai 1823, National Museum Tokyo)	144
Abb. 12.2	Konvektionsschema von Auftrieb vs. Reibung	147
Abb. 12.3	Mosaikformation durch Konvektion	148
Abb. 12.4	Benard-Marangoni-Konvektion von Siliziumöl. (Aus Maroto et al., 2007)	149
Abb. 12.5	Anordnung des Libchaber-Maurer-Experiments	150
Abb. 12.6	Beginn der Oszillation der Konvektionsrolle	150
Abb. 12.7	Zeitliche Variation der Noten A und D (a) und der Überlagerung von A und D (b). Einfachheitshalber haben wir für die Note A 1 Hz und für die Note D 1.5 Hz gesetzt	151
Abb. 12.8	Fourier-Transformation der Summe von zwei Frequenzen A und D	153
Abb. 12.9	Die von Libchaber und Maurer gemessene Spektralverteilung	154
Abb. 12.10	Entwicklung der Spektralverteilung im Libchaber-Maurer-Experiment; die Stärken sind in Einheiten von f_0^2 gegeben	155
Abb. 14.1	Frequenz vs. Rang für Wörter der englischen Sprache, nach dem Susanne-Korpus (nach Jäger und Van Rooij, 2007). Die Gerade ist das Zipf'sche Gesetz. Beide Skalen sind logarithmisch	167
Abb. 14.2	Zipf'sches Gesetz für Primzahlfaktoren bis 400	169
Abb. 14.3	Rangordnung vs. Größe der 135 größten Städte der USA (Gabaix, 1999)	170
Abb. 15.1	Starenschwarm. (Foto: Tommy Hansen)	174

Abb. 15.2	Der Ausgangsspin des roten Vogels (a) wird im nächsten Schritt durch die mittlere Richtung aller Spins (b) in der vorgegebenen Nachbarschaft (blauer Kreis) ersetzt. Dieser Vorgang wird für alle Spins wiederholt	175
Abb. 15.3	Entwicklungsstufen des Vicsek-Modells. a Geringe Dichte und starke Fluktuation. b Mittlere Dichte und Fluktuation. c Hohe Dichte und geringe Fluktuation	176
Abb. 15.4	Wendemanöver eines Starenschwarmes. (Nach Ballerini et al., 2008)	178
Abb. 15.5	Orientierung von benachbarten Vögeln	179
Abb. 16.1	Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926)	189
Abb. 16.2	Einsetzen von Supraleitung	189
Abb. 16.3	Schematische Darstellung der Cooper-Paar-Formation	191



1

Teilen und Zusammenfügen

Du siehst den Wald vor lauter Bäumen nicht.

Deutsches Sprichwort

1.1 Divide et impera

So weit unsere Überlieferungen zurückreichen, haben die Menschen versucht, die Welt zu verstehen, in der sie leben; das reicht von Höhlenmalereien bis zur Erforschung des Weltalls. Wir wollen wissen, wie die Dinge geartet sind, woraus sie bestehen und welchen Kräften sie ausgesetzt sind. Die Naturwissenschaften, insbesondere Physik und Chemie, haben dabei in den letzten 2000 Jahren ein sehr erfolgreiches Vorgehen entwickelt, das sich vielleicht am besten mit dem lateinischen Spruch „Divide et impera“ („Teile und beherrsche“) zusammenfassen lässt. Wir zerlegen das komplexe Gesamtbild in kleine, über-

sichtliche Einzelteile, die wir verstehen können. Wenn das klappt, setzen wir diese Bausteine wieder zusammen und hoffen, so die ganze Welt zu verstehen. Dieser Zugang entstand im antiken Griechenland, mit der Idee von Atomen als den kleinsten Bausteinen aller Materie; die Vielfalt der Welt ergibt sich dann als das Ergebnis verschiedener Zusammensetzungen der Atome. Vergangene Jahrhunderte haben dieses Atombild präzisiert. Es gibt Atomkerne und sie umkreisende Elektronen; der Kern ist seinerseits zusammengesetzt aus Nukleonen – Protonen und Neutronen. Nach den neuesten Erkenntnissen bestehen diese wiederum aus Quarks, die aber nicht alleine, sondern nur als Bestandteile von etwas Größerem existieren können. Die Wechselwirkungen zwischen diesen verschiedenen Bausteinen werden durch elektromagnetische Kräfte und Kernkräfte vermittelt, und in den letzten Jahrzehnten ist es gelungen, all diese Teilchen und die entsprechenden Kräfte zu einer einheitlichen Theorie, dem sogenannten Standardmodell, zu vereinigen. So nahe waren wir noch nie an einer „Weltformel“. Die einzige Kraft, die bisher allen Vereinigungsversuchen widerstanden hat, ist die Schwerkraft. Trotz aller Ansätze auch der einflussreichsten Physiker ist es bisher nicht gelungen, eine Theory of Everything zu formulieren. Nicht nur das: In den letzten Jahren wurde sogar vorgeschlagen, dass die Schwerkraft von Natur aus anders sei als die anderen Kräfte und deshalb nicht in eine einheitliche Theorie passe. Wir kommen auf diese neue Sicht der Dinge noch im Einzelnen zurück.

1.2 Die Grenzen des Reduktionismus

Die Philosophen des antiken Griechenlands haben aber nicht nur den eben beschriebenen *Reduktionismus* begründet; sie haben auch gewarnt, dass eine solche Sicht auf

Grenzen stößt. Am besten zusammengefasst hat das sicher Aristoteles mit der zitierten Feststellung, dass das Ganze mehr sei als nur die Summe seiner Teile. Im Reduktionsprozess der Zerlegung in kleinste Einzelteile gehen damit notwendigerweise bestimmte Eigenschaften des Ganzen verloren, und wenn wir die Bausteine später auf eine bestimmte Weise wieder zusammensetzen, ist nicht klar, ob wir auch die Ausgangswelt wieder erhalten. Zerlegen und Zusammensetzen sind das Yin und Yang der Naturwissenschaft, entgegengesetzt und gleichzeitig komplementär. Das Verständnis des einen bedeutet nicht auch ein Verständnis des anderen.

So haben die Erfolge des Reduktionszugangs, „teile und beherrsche“, in den vergangenen Jahren oft die Kehrseite der Medaille in den Hintergrund gedrängt: Wenn man die Bausteine kennt, was kann man dann daraus bauen? Die Kenntnis der Atomstruktur hieß nicht, das Verhalten von Materie zu verstehen, genauso wenig wie die Anatomie eines Vogels das Verhalten eines Vogelschwarmes erklären kann. In vielen Zuständen der Materie sind räumlich entfernte Bestandteile völlig unabhängig voneinander – 10 m entfernte Luftmoleküle haben wenig miteinander zu tun –, und idealisierte System dieser Art haben viel zu unserem Verständnis von Materie beigetragen. In diesen Fällen ist einfaches Zerlegen und Zusammensetzen möglich. Wenn aber ein System von einem Zustand in einen anderen übergeht, etwa beim Verdampfen, Schmelzen oder Gefrieren, dann hört das auf: Das System weigert sich jetzt, in unabhängige kleine Untersysteme aufgeteilt zu werden, alles hängt nun irgendwie zusammen. Das hat die Physiker irritiert, und deshalb haben sie es als *kritisches Verhalten* bezeichnet. Heute wissen wir, dass viele Systeme ein solches „ungewünschtes“ Verhalten aufweisen. Wir finden immer mehr Verhaltensformen, die nur für Systeme von vielen Bestandteilen einen Sinn machen. Ein einzelnes Atom kann nicht gefrieren, schmelzen oder verdampfen;

solche Vorgänge machen nur Sinn für kollektive Vielteilchensysteme. Sie sind das erste Signal von Komplexität: Das Ganze ist jetzt eindeutig mehr als die Summe seiner Teile.

Es wurde somit immer offensichtlicher, dass das Verständnis der Elementarteilchen und der zwischen ihnen wirkenden Kräfte, also der ultimative Reduktionszugang mit einer Theory of Everything, letztlich nicht die wesentliche Einsicht liefern kann für das Verständnis von Systemen, die aus vielen solchen Teilchen bestehen. Es stellte sich heraus, dass der entgegengesetzte Zugang, das Zusammenfügen, auf seine eigenen Gesetze führt, die oft nur wenig von der Natur der Teilchen und ihrer speziellen Wechselwirkung abhängen. Die Magnetisierung von Eisen, die Kondensation eines Gases, die Entstehung einer Galaxie oder selbst die eines Vogelschwarmes – sie alle führen auf recht ähnliche Entwicklungsformen. Aus dieser Sicht ist die wirklich neue Physik der letzten 50 Jahre die Physik vom kollektiven Verhalten, von Systemen, die nicht beliebig in viele kleine zerlegt werden können. Die Beschreibung von kritischem Verhalten durch Renormierung, durch eine vergleichende Untersuchung von Systemen aller Skalengrößen, brachte 1982 dem amerikanischen Theoretiker Kenneth Wilson den Nobelpreis für Physik. Kurz vorher hatte sein Kollege Ilya Prigogine in Belgien, auch Nobelpreisträger, bereits bemerkt, dass „die Komplexität in die physikalische Wissenschaft einfällt“. Die Welt ist in der Tat voll von Vorgängen, die nur in Vielteilchensystemen auftreten und nur als solche verständlich sind.

Solche Vorgänge und ihre Erklärung sind das Thema dieses Buches, und ich möchte sie verständlich darstellen für allgemein interessierte Leser, mit einem Minimum an Mathematik. Ganz verzichten darauf konnte ich nicht: Manche Zusammenhänge sind sonst nur schwer darzustel-