



**TECHNIK IM FOKUS**

DATEN FAKTEN HINTERGRÜNDE

Frank-Michael Dittes

# Komplexität

Warum die Bahn nie pünktlich ist



Springer Vieweg

## **Technik im Fokus**

## **Technik im Fokus**

Photovoltaik – Wie Sonne zu Strom wird

Wesselak, Viktor; Voswinckel, Sebastian, ISBN 978-3-642-24296-0

Komplexität – Warum die Bahn nie pünktlich ist

Dittes, Frank-Michael, ISBN 978-3-642-23976-2

Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?

Neles, Julia Mareike; Pistner, Christoph (Hrsg.), ISBN 978-3-642-24328-8

Energie – Die Zukunft wird erneuerbar

Schabbach, Thomas; Wesselak, Viktor, ISBN 978-3-642-24346-2

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter

<http://www.springer.com/series/8887>

Frank-Michael Dittes

# Komplexität

Warum die Bahn nie pünktlich ist

 Springer Vieweg

Frank-Michael Dittes  
Nordhausen, Deutschland

Extra-Material unter <http://extras.springer.com/2012/978-3-642-23976-2>  
Extra-Programme unter <http://www.dittes-komplexitaet.de>

ISSN 2194-0770

ISBN 978-3-642-23976-2

ISBN 978-3-642-23977-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-642-23977-9

Springer Berlin Heidelberg Dordrecht London New York

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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.

*Lektorat:* Eva Hestermann-Beyerle

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.

Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media

[www.springer.com](http://www.springer.com)

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung: Komplexität und Pünktlichkeit</b> .....	1
Literatur .....	5
<b>2 Beziehung ist alles: Komplexität und Korrelation</b> .....	7
2.1 Alles Gauß, oder? .....	7
2.2 Korreliertes Verhalten .....	13
2.3 Ein Modell für gekoppelte Ereignisse: die Kettenreaktion .....	16
2.4 Was heißt denn hier kritisch? .....	21
Literatur .....	26
<b>3 Wider den Einheitsbrei: Komplexität und strukturelle Vielfalt</b> .....	27
3.1 Von kleinen und großen Zahlen: Strukturen auf allen Skalen .....	27
3.2 Da vergeht einem Hören und Sehen: potenzierte Wahrnehmung und ihre Grenzen .....	32
3.3 Potenzgesetze überall .....	39
Literatur .....	44

<b>4</b>	<b>Selbst ist der Mann: Komplexität und selbstorganisierte Kritikalität</b> .....	45
4.1	Sandkastenspiele .....	45
4.2	Sand im Prozessor: ein Computermodell .....	49
4.3	Von unter- und über- und einfach kritischen Beben .....	52
	Literatur .....	57
<b>5</b>	<b>Was rauscht denn da? Komplexität und Fluktuation</b> .....	59
5.1	Frequenzen und ihre Analyse .....	59
5.2	Komplexität und Gedächtnis .....	62
5.3	Und wenn's nun doch bloß Zufall ist? .....	66
5.4	Komplexität aus Nullen und Einsen .....	70
	Literatur .....	76
<b>6</b>	<b>Haarscharf am Abgrund: Komplexität und Chaos</b> .....	77
6.1	Komplexität zwischen Ordnung und Chaos .....	77
6.2	Je oller, je doller: warum alles immer komplexer wird ...	81
6.3	Wie die Lemminge: ein Wachstumsmodell .....	87
6.4	Strukturen auf allen Skalen: die Schönheit der Kante ...	93
6.5	Edge of chaos: die ultimative Komplexität .....	97
	Literatur .....	100
<b>7</b>	<b>Halten und gehalten werden: Komplexe Netze</b> .....	103
7.1	Zusammenhalt gefragt .....	103
7.2	Wer da hat, dem wird gegeben – Komplexität durch bevorzugte Anlagerung .....	107
7.3	Komplexe Netze überall .....	112
	Literatur .....	116
<b>8</b>	<b>Die Komplexität der Bahn</b> .....	117
8.1	Ein komplexes Netz .....	117
8.2	Wenn der Knoten platzt – die Bahn an der Kante .....	123
8.3	Ja mach nur einen Plan .....	125
8.4	Wie pünktlich kann die Bahn denn sein? .....	126
	Literatur .....	131

---

<b>9 Bitte zurücktreten – 5 Wege, Komplexität zu reduzieren . . .</b>	<b>133</b>
9.1 Simplify your System . . . . .	133
9.2 Vergiss die Puffer nicht. . . . .	134
9.3 Teile und herrsche . . . . .	136
9.4 Exportiere Probleme . . . . .	136
9.5 Auf zu neuen Horizonten . . . . .	137
Literatur . . . . .	138
<b>10 Zum Schluss: Verweile doch, du bist so schön. . . . .</b>	<b>139</b>
<b>11 Anhang: Wenn’s mal wieder länger dauert . . . . .</b>	<b>141</b>
11.1 Eine Runde Poker spielen. . . . .	141
11.2 Wie geht’s weiter mit dem Geld? . . . . .	143
11.3 Schneeflocken basteln. . . . .	145
11.4 Ein Netz entwerfen. . . . .	147
11.5 Komplexität beobachten . . . . .	147
Literatur . . . . .	148
<b>Verwandte und weiterführende Literatur . . . . .</b>	<b>149</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>151</b>

---

# Einführung: Komplexität und Pünktlichkeit

# 1

Pünktlich wie die Uhr – so heißt es gern, wenn jemand genau zur verabredeten Zeit erscheint – sei es nun zum Seminar, zum Meeting oder zu einem „Date“, wie meine Studenten sagen würden. Dabei ist selbst die mechanische Uhr, auf der dieser Spruch beruht, schon ein recht komplexes System: Räder greifen ineinander, Federn spannen und entspannen sich, leise tickt die Unruh ... Bereits hier zeigt sich, dass Komplexität auch ihre Tücken hat: Wehe, Sand kommt ins Getriebe oder eine Achse bricht, dann geht auf einmal gar nichts mehr. Und je feiner das Uhrwerk, desto anfälliger ist es für Störungen. Oder nehmen wir die Bahn. Natürlich ist sie nicht „nie pünktlich“ – der Leser verzeihe den „PR-Trick“ des Buchtitels – aber ihr Fahrplan ist mindestens ebenso anfällig für Störungen wie das o. g. Uhrwerk. Jeder Reisende hat seine eigenen Erfahrungen damit und mindestens eine Meinung dazu. Und überhaupt, was hat Pünktlichkeit mit Komplexität zu tun? – ein Zusammenhang, den wir im Folgenden betrachten wollen.

Die Definition der *Pünktlichkeit* scheint jedem klar: Es ist das Einhalten einer Verabredung oder eines versprochenen Zeitpunkts. Früher hieß es zu Hause: „Mittag gibt es um 12, aber sei pünktlich!“ Oder noch schlimmer: „5 Minuten vor der Zeit ist die gewohnte Pünktlichkeit.“ Na ja, das wäre bei der Bahn auch nicht so gut, jedenfalls nicht zur Abfahrt. Aber was ist *Komplexität*? Wieso gibt es sie überhaupt, wäre ein Leben ohne sie nicht viel einfacher? Wieso werden und sind Systeme komplex? Ist Komplexität messbar? Ist sie gut und wenn ja, in welchem Sinne?

Das vorliegende Buch will einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen leisten. Es setzt dazu Komplexität in Beziehung zu anderen Begriffen wie Korrelation, Vielfalt oder Vernetzung und illustriert deren Zusammenhänge an zahlreichen Beispielen. Dies sind zum einen *reale Systeme* – im Kontext dieser Reihe in erster Linie technische – zum anderen sind es *einfache Modelle*, für die ich Computersimulationen erstellt habe. Sie können gern selbst damit „spielen“ – die entsprechenden Programme finden Sie unter <http://www.dittes-komplexitaet.de>.

Um es vorweg zu nehmen: Es gibt keine *allgemein* gültige Definition von Komplexität – in verschiedenen Bereichen wird sie teilweise unterschiedlich beschrieben.

- Systemtheoretisch wird Komplexität mit der Größe und der Vielschichtigkeit von Systemen in Beziehung gebracht: „Die Komplexität eines Systems steigt mit der Anzahl an Elementen, der Anzahl an Verknüpfungen zwischen diesen Elementen sowie der Funktionalität dieser Verknüpfungen (zum Beispiel Nicht-Linearität).“ [1]
- In der Volkswirtschaftslehre heißt es: Komplexität ist die „Gesamtheit aller voneinander abhängigen Merkmale und Elemente, die in einem vielfältigen aber ganzheitlichen Beziehungsgefüge (System) stehen. Unter Komplexität wird die Vielfalt der Verhaltensmöglichkeiten der Elemente und die Veränderlichkeit der Wirkungsverläufe verstanden.“ [2] In der Soziologie wurde von J. Habermas in Zusammenhang mit komplexem Verhalten der Begriff der „Unübersichtlichkeit“ ins Spiel gebracht.
- Und Komplexität im Bereich der Technik? Dafür gibt es in Magdeburg ein ganzes Max-Planck-Institut, das die zunehmende Integration von Prozessen bei wachsender Verschiedenartigkeit der Anforderungen – hohe Qualität, sparsamer Ressourcenverbrauch, hohe Ausbeute, minimale Umweltbelastung – untersucht [3].

Eine andersartige Definition wird darüber hinaus in der Informatik verwendet, wo Komplexität sowohl für den Rechenaufwand zur Lösung eines Problems als auch für den Informationsgehalt von Daten stehen kann. Die Erörterung dieser speziellen Facetten würde allerdings den Rahmen dieses Buches sprengen, wir verweisen den Leser stattdessen auf die entsprechende Literatur.

Wie man sieht, sind bereits die Definitionen der Komplexität ziemlich komplex. Generell hat Komplexität dabei zwei Aspekte: den der komplexen *Struktur* und den des komplexen *Verhaltens* eines Systems. Beide Aspekte sollen in diesem Buch beleuchtet und in Zusammenhang gebracht werden.

*Komplexe Struktur* bedeutet: Das System hat viele oder vielfältige Elemente, die intensive Wechselbeziehungen aufweisen. Jedes Element ist mit anderen verknüpft; die Art der Verknüpfungen kann ihrerseits nicht-trivial, z. B. nicht-linear sein. Infolge der Verflechtungen der Elemente bilden sich vielschichtige innere Strukturen aus.

Damit ist auch der wesentliche Unterschied zur *Kompliziertheit* formuliert: Kompliziert nennen wir ein System, das zwar viele Elemente, aber wenig Struktur, z. B. nur wenige Schichten aufweist. Ein Kreuzworträtsel zu lösen oder ein Puzzle zu legen kann kompliziert sein, ebenso wie einen Knoten zu entwirren oder den Ausweg aus einem Labyrinth zu finden. Wir nennen eine Mathe-Aufgabe kompliziert, wenn sie schwer zu lösen ist, z. B. wenn sie viele Rechenschritte erfordert. Dagegen bezeichnen wir ein Problem in der Regel als *komplex*, wenn schon der Lösungsansatz schwierig ist. Die Eindämmung der Erderwärmung oder die Bewältigung von Schuldenkrisen sind solche komplexen Probleme. Ihre Lösung kann nur durch ein Bündel von Einzelmaßnahmen erreicht werden, deren Wirkung von einer Vielzahl an Faktoren abhängt und die sich zum Teil gegenseitig beeinflussen.

Komplexität zeigt sich aber nicht nur im Aufbau von Systemen, sondern auch in deren *komplexem Verhalten*. Darunter versteht man zunächst die Vielfalt von Reaktionsmöglichkeiten: Je nach Blickwinkel und nach der an das System gestellten Frage kann es verschiedene, z. T. widersprüchliche Seiten offenbaren. Menschen zeigen komplexes Verhalten, ebenso wie soziale Systeme, aber auch technische oder Ökosysteme. Eine Folge davon ist die Fähigkeit zur *Adaption*, d. h. zur Anpassung des Verhaltens an neue Herausforderungen – die Entwicklungsfähigkeit also. Zum anderen zieht Komplexität aber eine gewisse Unvorhersagbarkeit des Verhaltens nach sich. Das System hat den Rahmen einfacher Ursache-Wirkungs-Beziehungen verlassen und zeigt mehr oder weniger ausgeprägte Anzeichen von chaotischem Verhalten. Dies ist auch bei technischen Systemen augenfällig, besonders bei solchen, die an der Grenze zur technologischen Machbarkeit liegen: Weltraum-

senden, verteilte Informationssysteme, generell *Netze*, auf die wir noch ausführlich zu sprechen kommen.

Komplexität hat unseren Alltag durchdrungen. Wir können ihr nicht ausweichen, aber wir müssen sie beherrschbar halten. Damit komme ich auf ein *zweites Anliegen* dieses Buches: es soll helfen, Komplexität „in die Normalität“ zu holen, die häufig anzutreffende Skepsis, ja direkte Angst vor ihr abzubauen. Albert Einstein hat einmal gesagt, man solle eine Sache so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher. Ohne ein gewisses Maß an Komplexität sind viele Dinge weder zu verstehen noch zu lösen. Wo die Grenze zwischen zulässiger und unzulässiger Vereinfachung liegt, muss für jedes Problem neu ausgelotet werden:

- in der Politik, wo gemeinhin nur einfache Lösungen als „zumutbar“ angesehen werden, wo die Vielschichtigkeit von Problemen gar zu leicht unter den Tisch gekehrt wird oder wo jede „Seite“ gern nur die ihr genehmen Aspekte herausgreift.
- im Alltag, wo auch wir allzu oft den einfachen Weg gehen wollen.
- in der Technik, wo wir gern einfach zu bedienende Geräte und Systeme hätten, auch wenn das der Komplexität des Problems nicht angemessen ist.

Die Komplexität vieler Systeme erhöht sich scheinbar unaufhaltsam. Wir profitieren davon, indem sie in einem noch zu erläuternden Sinne „besser“ werden. Ein normales Auto verfügt mittlerweile über Spurhaltesysteme, automatische Abbremsmechanismen, es zeigt an, wie man am besten einem Stau ausweicht usw. Alles nützliche Komponenten, aber wehe, wenn sie ausfallen oder gar außer Kontrolle geraten. Wir möchten auf die Errungenschaften der komplexen Technik nicht verzichten – und scheinen doch der damit verbundenen Komplexität ausgeliefert zu sein. Komplexität hat offenbar ihren Preis: Wir werden zeigen, dass mit wachsender Komplexität ein Streben zu *kritischem Verhalten* einhergeht, mit dem auch eine wachsende Störanfälligkeit des Systems verbunden sein kann. Und wir werden erläutern, wie man dieser Tendenz entgegenwirken kann.

Das vorliegende Buch gliedert sich folgendermaßen: In Kapitel 2 untersuchen wir, wie die *Wechselbeziehungen* zwischen den Teilen eines Systems zur Ausbildung von Komplexität führen. Dabei zeigt sich die zentrale Rolle von *Wahrscheinlichkeiten* und wir stoßen auf die

besondere Bedeutung *kritischer Punkte*, die stabiles von instabilem Verhalten trennen. Kapitel 3 illustriert den Aspekt der *Vielschichtigkeit* komplexer Systeme. Die dabei auftretenden Potenzgesetze werden als zentrales Merkmal von Komplexität herausgestellt und an verschiedenen Beispielen illustriert. In Kapitel 4 wird die Rolle der *Selbstorganisation* von Systemen bei der Ausbildung komplexen Verhaltens untersucht, dem daraus resultierenden Auftreten großer *Fluktuationen* ist Kapitel 5 gewidmet. Der Zusammenhang zwischen Komplexität und *Chaos* nimmt das sechste Kapitel ein, bevor ich mit der Betrachtung komplexer *Netze* in Kapitel 7 den Bogen zur Komplexität der *Bahn* schlage (Kapitel 8). Betrachtungen über die Notwendigkeit und die Möglichkeit der *Reduktion von Komplexität* schließen das Buch ab.

Komplexe technische Systeme müssen funktionieren und sich an den Interessen der Benutzer orientieren. Vielleicht geht es Ihnen nach der Beschäftigung mit Komplexität aber ein bisschen wie mir: Ich sehe manche Störung, wie sie in komplexen Systemen nun mal auftritt, mit anderen Augen an – sogar die eine oder andere Unpünktlichkeit der Bahn. Ich wünsche Ihnen eine spannende Reise.

---

## Literatur

- [1] P Milling: Systemtheoretische Grundlagen zur Planung der Unternehmenspolitik. Duncker & Humblot, Berlin, 1981
- [2] E Winter, R Mosen, L Roberts (HG): Gabler Wirtschaftslexikon. Gabler-Verlag, 2010
- [3] Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme. Nach <http://www.mpi-magdeburg.mpg.de/>

---

## Zusammenfassung

In diesem Kapitel gehen wir auf die erste Voraussetzung für das Entstehen eines komplexen Systems ein: Seine Komponenten müssen miteinander in Beziehung stehen. Als typisches Beispiel dienen uns dazu *Kettenreaktionen*. Wir werden drei verschiedene Verhaltensmuster beobachten: Auf der einen Seite das schnelle Abklingen, auf der anderen Seite das explosive Anwachsen der Reaktion. Und wir stoßen zum ersten Mal auf das *kritische Verhalten* an der Grenze zwischen diesen beiden Mustern.

---

## 2.1 Alles Gauß, oder?

Erinnern Sie sich noch an den guten alten 10-DM-Schein? Er setzte einem der größten deutschen Mathematiker ein Denkmal, Carl Friedrich Gauß. Gauß lebte von 1777 bis 1855, und er leistete auf vielen Feldern Bahnbrechendes. Seine Tätigkeit als Geodät wurde im Bestseller-Roman „Die Vermessung der Welt“ von Daniel Kehlmann [1] eindrucksvoll beleuchtet. Vor allem aber war er der „Mathematikerfürst“. Seine mathematischen Arbeiten reichen von der Konstruktion regelmäßiger Vielecke bis zur Gaußschen Osterformel, mit deren Hilfe das Osterdatum jedes beliebigen Jahres berechnet werden kann. Eine seiner frühen

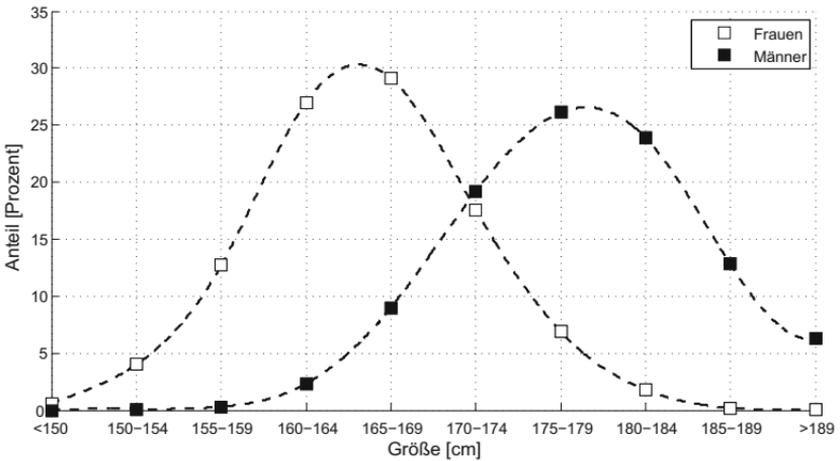
Leistungen, ein mit Zirkel und Lineal konstruiertes 17-Eck, findet sich sogar auf seinem Grabstein eingraviert.

Was uns hier jedoch interessiert, ist die *Gaußverteilung* – die auf dem Geldschein abgebildete Glockenkurve, s. Abb. 2.1. Diese Kurve gibt die Verteilung von Wahrscheinlichkeiten bei bestimmten Zufallsprozessen an. Meine Studenten nahmen einen 10-DM-Schein denn auch gern mit in die Statistik-Klausuren, als nicht ganz legales, aber doch augenzwinkernd geduldetes Hilfsmittel.

Konkret: Eine Gaußkurve entsteht immer dann, wenn viele unabhängige Ereignisse oder Parameter zusammengestellt werden. Ein schönes Beispiel hierfür ist die Häufigkeitsverteilung der Körpergrößen in Deutschland [2], s. Abb. 2.2. Die Körpergrößen sind sicher *statistisch unabhängig* voneinander: Egal ob jemand kurz oder lang, dick oder dünn ist, seine Größe hat keinen Einfluss auf die Größen anderer Menschen. Bestenfalls beeinflusst sie die Größe seiner Nachkommen, aber deren Zahl ist vernachlässigbar klein im Vergleich zur Gesamtheit der 80 Millionen Bundesbürger. Auch eine weitere Voraussetzung für das Zustandekommen der Gaußkurve ist im betrachteten Fall gegeben: die Grundgesamtheit muss *homogen*, d. h. im Wesentlichen gleichartig, sein. Für biologische Systeme heißt das im Wortsinne „der gleichen Art“ zugehörig. So sähe die Verteilungsfunktion der Körpergrößen von 1000 Elefanten *und* 1000 Mäusen natürlich nicht der Glockenkurve



**Abb. 2.1** 10-DM-Schein



**Abb. 2.2** Verteilung der Körpergrößen in Deutschland

ähnlich, sondern würde eine Überlagerung *zweier* Gaußkurven sein – eine mit einem Maximum bei der mittleren Mausgröße und eine bei der der Elefanten. Übertragen auf andere Systeme bedeutet dies, dass für alle Elementarereignisse vergleichbare Bedingungen herrschen müssen.

Das Entstehen einer Gaußkurve kann jeder selbst ausprobieren. Falls Sie gerade nicht 80 Millionen Freunde zur Hand haben oder das Zentralregister der vergangenen Volkszählung einsehen können, so reicht dafür auch eine einfache Münze, die sie mehrmals hintereinander werfen. Wenn die Münze ideal ist, d. h. keine bevorzugte Seite aufweist, dann sollten bei jedem Wurf „Kopf“ und „Zahl“ mit der gleichen Wahrscheinlichkeit, nämlich  $1/2$ , fallen. Im Mittel sollten beide Seiten also gleich oft erscheinen. Um es besser darstellen zu können, denken wir uns im Folgenden, die Münze hätte eine weiße und eine schwarze Seite, veranschaulicht als  $\circ$  und  $\bullet$ . Wir werfen die Münze jetzt wieder und wieder und zählen, wie oft sie dabei auf die schwarze Seite fällt.

### Definition

#### Elementarereignis

Einzelnes Ereignis, das einen Beitrag zum Gesamtergebnis liefert, z. B. einmaliges Werfen einer Münze. Jedes Elementarereignis hat ein konkretes Ergebnis, z. B. „Kopf“.