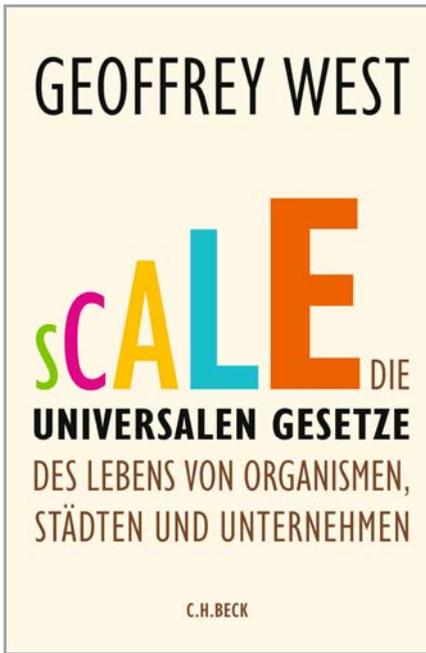


Unverkäufliche Leseprobe



**Geoffrey West**

**Scale**

Die universalen Gesetze des Lebens von  
Organismen, Städten und Unternehmen

2019. 478 S., mit Abbildungen

ISBN 978-3-406-74191-3

Weitere Informationen finden Sie hier:

<https://www.chbeck.de/27896321>

© Verlag C.H.Beck oHG, München

GEOFFREY WEST

# SCALE

Die universalen Gesetze  
des Lebens von Organismen,  
Städten und Unternehmen

*Aus dem Englischen  
von Jens Hagedstedt*

C.H.BECK

Titel der englischen Originalausgabe:  
Scale. The Universal Laws of Growth, Innovation, Sustainability,  
and the Pace of Life in Organisms, Cities, Economies, and Companies

Copyright © 2017 by Geoffrey West

Zuerst erschienen 2017 bei Penguin Press, New York

Mit zahlreichen Abbildungen

Für die deutsche Ausgabe:

© Verlag C.H.Beck oHG, München 2019

[www.chbeck.de](http://www.chbeck.de)

Umschlaggestaltung: Kunst oder Reklame, München

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Gedruckt auf säurefreiem und alterungsbeständigem Papier

(hergestellt aus chlorfrei gebleichtem Zellstoff)

Printed in Germany

ISBN 978 3 406 74191 3



klimateutral produziert

[www.chbeck.de/nachhaltig](http://www.chbeck.de/nachhaltig)

*Für  
Jacqueline  
Joshua und Devorah  
und  
Dora und Alf  
in Dankbarkeit und Liebe*

# INHALT

## I. DAS GROSSE GANZE 11

1. Einführung 11 • 2. Wir leben in einer exponentiell wachsenden sozioökonomischen urbanisierten Welt 18 • 3. Leben und Tod 20 • 4. Energie, Stoffwechsel und Entropie 22 • 5. Es kommt wirklich auf die Größe an: Skalierung und nicht-lineares Verhalten 25 • 6. Skalierung und Komplexität: Emergenz, Selbstorganisation und Resilienz 29 • 7. Sie sind die Gesamtheit ihrer Netzwerke: Wachstum von der Zelle bis zum Wal 35 • 8. Städte und globale Nachhaltigkeit: Innovation und Zyklen von Singularitäten 38 • 9. Unternehmen 42

## 2. DAS MASS ALLER DINGE 45

*Eine Einführung in das Skalieren*

1. Von Godzilla zu Galileo Galilei 45 • 2. Falsche Vorstellungen von Skalierung: Superman 53 • 3. Größenordnungen, Logarithmen, Erdbeben und die Richterskala 55 • 4. Eisen stemmen und Galilei testen 58 • 5. Individuelle Leistung und Abweichungen von den errechneten Werten: der stärkste Mann der Welt 60 • 6. Weitere falsche Vorstellungen von Skalierung: Drogen- und Medikamentendosierungen (LSD bei Elefanten, Tylenol bei Babys) 61 • 7. Der BMI, Quetelet, der Durchschnittsmensch und soziale Physik 65 • 8. Innovation und die Grenzen des Wachstums 69 • 9. Die «Great Eastern», Breitspureisenbahnen und der bemerkenswerte Isambard Kingdom Brunel 73 • 10. William Froude und die Ursprünge der Modellbildungstheorie 78 • 11. Ähnlichkeit: dimensionslose und skaleninvariante Zahlen 85

## 3. DIE SIMPLIZITÄT UND KOMPLEXITÄT DES LEBENS 89

1. Von Quarks und Strings zu Zellen und Walen 92 • 2. Stoffwechselrate und natürliche Selektion 98 • 3. Die Simplizität, die der Komplexität zugrunde liegt: Kleibers Gesetz, Selbstähnlichkeit und Skaleneffekte 100 • 4. Allgemeingültigkeit und die das Leben beherrschende magische Zahl 4 103 • 5. Energie, emergente Ge-

setze und die Hierarchie des Lebens 109 • 6. Netzwerke und der Ursprung der allometrischen  $\frac{1}{4}$ -Potenz-Skalierung 113 • 7. Physik trifft Biologie: über das Wesen von Theorien, Modellen und Erklärungen 115 • 8. Netzwerkprinzipien und der Ursprung der allometrischen Skalierung 121 • 9. Die Stoffwechselraten und Kreislaufsysteme von Säugetieren, Pflanzen und Bäumen 127 • 10. Exkurs über Nikola Tesla, Impedanzanpassung und AC/DC 131 • 11. Zurück zu den Stoffwechselraten, den schlagenden Herzen und den Kreislaufsystemen 134 • 12. Selbstähnlichkeit und die Herkunft der magischen Zahl 4 135 • 13. Fraktale: der rätselhafte Fall der länger werdenden Grenzen 139

#### 4. DIE VIERTE DIMENSION DES LEBENS 155

*Wachstum, Altern und Tod*

1. Die vierte Dimension des Lebens 159 • 2. Warum gibt es keine Säugetiere von der Größe winziger Ameisen? 162 • 3. Und warum gibt es keine riesigen Säugetiere von der Größe Godzillas? 166 • 4. Wachstum 171 • 5. Die Erderwärmung, die exponentielle Skalierung der Temperatur und die Stoffwechseltheorie der Ökologie 181 • 6. Altern und Sterblichkeit 186

#### 5. VOM ANTHROPOZÄN ZUM URBANOZÄN 217

*Ein von Städten dominierter Planet*

1. Leben in exponentiell sich ausdehnenden Universen 217 • 2. Städte, Urbanisierung und globale Nachhaltigkeit 221 • 3. Exkurs: Was genau ist ein Exponential? 224 • 4. Der Aufstieg der Industriestadt und das Unbehagen in ihr 230 • 5. Malthus, Neo-Malthusianer und die großen Innovationsoptimisten 234 • 6. It's all energy, stupid! 241

#### 6. PRÄLUDIUM ZU EINER STÄDTEWISSENSCHAFT 253

1. Sind Städte und Unternehmen nichts anderes als sehr große Organismen? 253 • 2. Die heilige Jane und die Drachen 259 • 3. Zwischenbemerkung: meine persönlichen Erfahrungen mit Garten- und Retortenstädten 269 • 4. Zwischenergebnis und Fazit 272

## 7. AUF DEM WEG ZU EINER STÄDTEWISSENSCHAFT 275

1. Städte skalieren 277 • 2. Städte und soziale Netzwerke 287 • 3. Welches sind diese Netzwerke? 290 • 4. Städte: Kristalle oder Fraktale? 294 • 5. Städte als große soziale Brutkästen 300 • 6. Wie viele enge Freunde haben sie wirklich? Dunbar und seine Zahlen 310 • 7. Wörter und Städte 315 • 8. Die fraktale Stadt: das Soziale mit dem Materiellen verbinden 321

## 8. KONSEQUENZEN UND VORAUSSAGEN 331

*Von Mobilität und Lebenstempo zu sozialer Vernetzung, Diversität, sozialem Stoffwechsel und Wachstum*

1. Die Beschleunigung des Lebens 332 • 2. Leben auf einem immer schneller rotierenden Laufband: die Stadt als Zeitschrumpfungsmaschine 334 • 3. Pendlerzeiten und Größe der Städte 338 • 4. Das steigende Gehtempo 341 • 5. Sie sind nicht allein: Handys als Detektoren menschlichen Verhaltens 342 • 6. Verifizierung der Theorie: soziale Vernetzung in Städten 346 • 7. Die Gesetzmäßigkeit der Fortbewegung in Städten 352 • 8. Mehrleister und Minderleister 358 • 9. Reichtum, Innovation, Kriminalität und Belastbarkeit: Individualität und Rang von Städten 361 • 10. Nachhaltigkeit: ein kurzer Exkurs zum Thema Wasser 366 • 11. Die sozioökonomische Diversität der geschäftlichen Aktivitäten in Städten 369 • 12. Wachstum und Stoffwechsel der Städte 377

## 9. AUF DEM WEG ZU EINER UNTERNEHMENS- WISSENSCHAFT 385

1. Ist Walmart ein hochskalierter Tante-Emma-Laden? 390 • 2. Der Mythos vom unbegrenzten Wachstum 396 • 3. Die erstaunliche Einfachheit der Sterblichkeit von Unternehmen 400 • 4. Requiescant in pace 408 • 5. Warum Unternehmen sterben, Städte aber nicht 412

## 10. DIE VISION EINER GANZHEITLICHEN THEORIE DER NACHHALTIGKEIT 417

Immer schneller rotierende Laufbänder, Innovationszyklen und Singularitäten zu endlichen Zeitpunkten 418

## NACHWORT 433

1. Wissenschaft für das 21. Jahrhundert 433 • 2. Transdisziplinarität, komplexe Systeme und das Santa Fe Institute 437 • 3. Big Data: Paradigma 4.0 oder nur 3.1? 444

Postskriptum und Danksagung 455

Anmerkungen 465

Nachweis der Abbildungen 476

Personenregister 477



# DAS GROSSE GANZE

## I. EINFÜHRUNG

Leben ist wahrscheinlich das komplexeste und facettenreichste Phänomen, das es im Universum gibt. Es manifestiert sich in einer außerordentlichen Mannigfaltigkeit von Formen, Funktions- und Verhaltensweisen und in einer enormen Bandbreite von Größenordnungen. Man schätzt beispielsweise, dass es auf unserem Planeten mehr als acht Millionen Arten von Organismen gibt,<sup>1</sup> vom kleinsten, weniger als ein billionstel Gramm wiegenden Bakterium bis zum Blauwal mit einem Gewicht von bis zu zweihundert Millionen Gramm. In einem tropischen Urwald in Brasilien würden Sie auf einer Fläche von der Größe eines Fußballfeldes mehr als hundert verschiedene Arten von Bäumen und Tausende Arten von Insekten finden. Oder denken Sie an die erstaunlichen Unterschiede in der Weise, wie all diese Arten ihr Leben leben: wie sie gezeugt und geboren werden, wie sie sich fortpflanzen und wie sie sterben. Viele Bakterien leben nur eine Stunde lang und benötigen nur ein zehnbillionstel Watt, um am Leben zu bleiben, während Wale älter als hundert Jahre werden können und für ihren Stoffwechsel mehrere hundert Watt benötigen.<sup>2</sup> Und neben dieser wunderbaren Tapiserie biologischen Lebens gibt es ja noch die erstaunliche Vielfalt sozialen Lebens, die wir Menschen dem Planeten beschert haben, vor allem in Form von Städten und all den Phänomenen, die sie beherbergen, vom Handel über die Architektur bis zur Mannigfaltigkeit der Kulturen und den unzähligen Freuden und Leiden jedes ihrer Einwohner.

Wenn Sie die Komplexität eines dieser Phänomenbereiche mit der überaus einfachen Ordnung des Sonnensystems vergleichen, oder mit dem Gleichmaß, mit dem Ihrer Armbanduhr oder Ihrem iPhone zufolge die Zeit verrinnt, dann fragen Sie sich vielleicht, ob jener Komplexität ebenfalls eine (und sei es auch

verborgene) Ordnung zugrunde liegt. Kann es sein, dass alle Organismen, ja alle komplexen Systeme, von den Pflanzen über die Tiere bis zu den Städten und Unternehmen, einigen wenigen einfachen Gesetzen gehorchen? Oder ist das Schauspiel, das sich in den Wäldern, Savannen und Städten der Erde abspielt, nur eine Abfolge zufälliger Ereignisse, diktiert von Laune und Willkür? Ist es angesichts der Launenhaftigkeit des evolutionären Prozesses, der diese ganze Vielfalt hervorgebracht hat, nicht unwahrscheinlich, dass sich eine Gesetzmäßigkeit herausgebildet haben könnte? Schließlich hat sich doch jeder der zahllosen Organismen, die die Biosphäre ausmachen, jedes seiner Subsysteme, jedes Organ, jeder Zelltyp und jedes Genom in seiner besonderen Umwelt niche auf einem *eigenen* Weg und im Prozess der natürlichen Selektion entwickelt!

Werfen Sie jetzt bitte einen Blick auf die Diagramme der Abbildungen 1 bis 4. Jedes stellt eine bekannte Größe dar, die in Ihrem Leben eine wichtige Rolle spielt und hier jeweils einer anderen Größe gegenübergestellt ist. Im ersten Diagramm ist die Stoffwechselrate – die Nahrungsmenge, die jeden Tag benötigt wird, um am Leben zu bleiben – dem Körpergewicht einer Reihe von Tieren gegenübergestellt. Im zweiten ist die Anzahl der Herzschläge über die gesamte Lebensdauer ebenfalls dem Körpergewicht einer Reihe von Tieren gegenübergestellt. Im dritten ist die Zahl der Patente, die in einer Stadt erworben wurden, deren Einwohnerzahl gegenübergestellt. Und im vierten und letzten Diagramm sind Eigenkapital und Einnahmen börsennotierter Unternehmen der Zahl ihrer Beschäftigten gegenübergestellt.

Sie brauchen kein Mathematiker oder Experte auf einem der vier Spezialgebiete zu sein, um auf den ersten Blick zu erkennen, dass diese Diagramme,

Beispiele für *Skalierungskurven*, die zum Ausdruck bringen, wie messbare Merkmale von Pflanzen, Tieren, Ökosystemen, Städten und Unternehmen mit deren Größe *skalieren*: (1) illustriert, wie sich die Stoffwechselrate,<sup>3</sup> (2), wie sich die Anzahl der Herzschläge über die gesamte Lebensdauer<sup>4</sup> zum Körpergewicht eines Tieres verhält; (3) illustriert, wie sich die Zahl der Patente, die in einer Stadt erworben wurden,<sup>5</sup> zu deren Einwohnerzahl verhält, und (4) illustriert, wie sich Kapital und Einnahmen eines Unternehmens<sup>6</sup> zur Zahl seiner Beschäftigten verhalten. Man beachte, dass diese Diagramme eine enorme Bandbreite von Größenordnungen abdecken: Beispielsweise ist sowohl beim Körpergewicht (von Mäusen bis zu Elefanten) als auch bei der Beschäftigtenzahl (von Ein-Personen-Unternehmen bis zu Großunternehmen wie Walmart und Exxon) der höchste Wert etwa eine Million Mal so hoch wie der niedrigste. Damit all diese Tierarten, Städte und Unternehmen von den Diagrammen erfasst werden können, wächst die Größenordnung auf jeder Achse jeweils mit dem Faktor 10.

Abb. 1

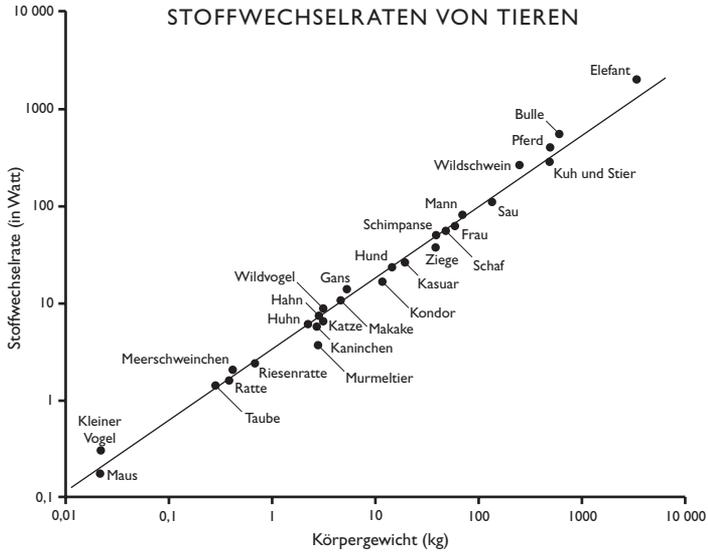


Abb. 2

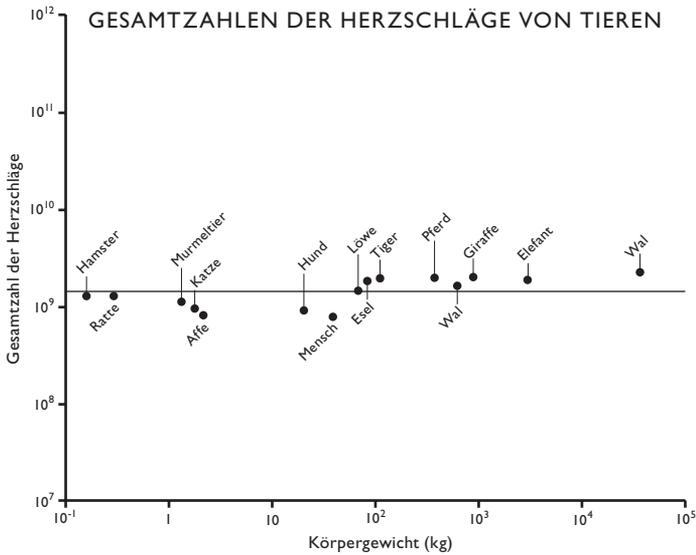


Abb. 3

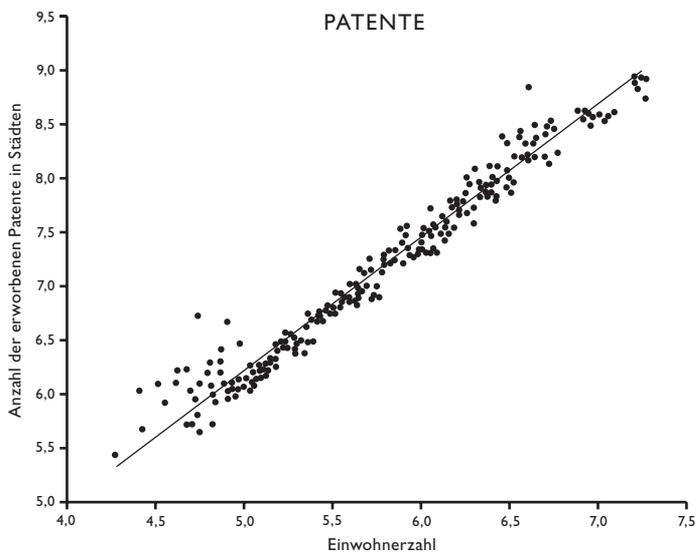
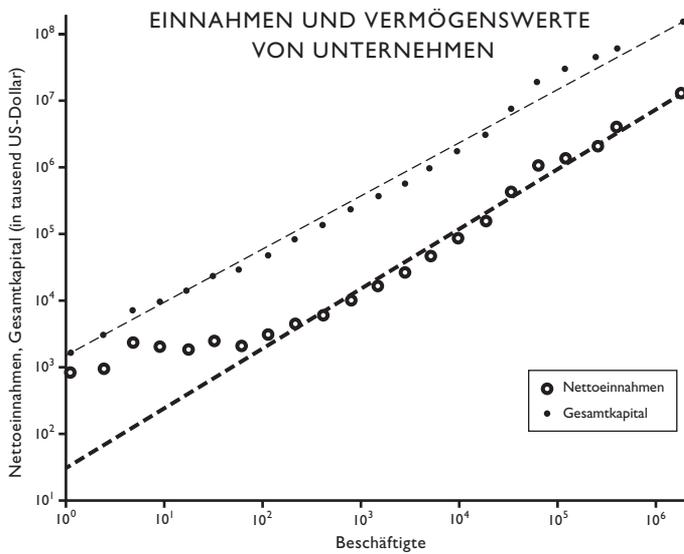


Abb. 4



obwohl sie einige der komplexesten Phänomene darstellen, mit denen wir es im Leben zu tun haben, jeweils eine außerordentlich einfache Gesetzmäßigkeit aufzeigen. Wie durch ein Wunder haben sich die Daten in nahezu geraden Linien angeordnet, statt sich regellos über die Fläche zu verteilen, wie man es aufgrund der historischen und geographischen Singularität jeder Tierart, jeder Stadt und jedes Unternehmens hätte erwarten können. Vielleicht am erstaunlichsten ist Abbildung 2, weil sie zeigt, dass die durchschnittliche Anzahl der Herzschläge über die gesamte Lebensdauer bei allen Säugetieren ungefähr gleich groß ist, obwohl kleine Säugetiere, wie Mäuse, nur wenige Jahre leben, während große, wie Wale, bis zu hundert Jahre alt werden können.

Die Beispiele der Abbildungen 1 bis 4 sind nur eine Auswahl aus einer sehr großen Zahl solcher *Skalierungsverhältnisse*, die für fast jedes messbare Merkmal von Pflanzen, Tieren, Ökosystemen, Städten und Unternehmen quantifizieren, wie es mit der Größe des Phänomens *skaliert*. Sie werden in meinem Buch vielen weiteren solcher Skalierungsverhältnisse begegnen. Die Existenz dieser bemerkenswerten Gesetzmäßigkeiten deutet stark darauf hin, dass es einen gemeinsamen Bezugsrahmen für die sich stark voneinander unterscheidenden hochkomplexen Phänomene gibt und dass die Dynamik, das Wachstum und die Organisation von Pflanzen, Tieren, menschlichem Sozialverhalten, Städten und Unternehmen ähnlichen allgemeinen «Gesetzen» unterliegen.

Das ist das Hauptthema des Buches. Ich werde erläutern, was es mit diesen Skalierungsgesetzen auf sich hat, woher sie entspringen, wie sie alle miteinander zusammenhängen, inwiefern sie ein tiefes und umfassendes Verständnis zahlreicher Aspekte des Lebens ermöglichen, aber uns schließlich auch mit der Herausforderung konfrontieren, die Zukunftsfähigkeit des Planeten zu sichern. Zusammengefasst gewähren uns diese Gesetze einen Einblick in grundlegende Prinzipien, die möglicherweise zur Erarbeitung eines quantifizierenden Ansatzes für die Auseinandersetzung mit einer Vielzahl wichtiger Fragen aus Wissenschaft und Gesellschaft führen können.

Dieses Buch handelt von einer Art zu denken, es stellt große Fragen und gibt wichtige Antworten auf einige dieser großen Fragen. Es schlägt vor, einige der großen Herausforderungen und Probleme, mit denen wir heute ringen – von der rasanten Urbanisierung, vom Bevölkerungswachstum und von der ungesicherten Zukunftsfähigkeit des Planeten bis zum Verständnis von Krebs, Stoffwechsel und den Ursachen von Altern und Tod –, auf der Basis eines ganzheitlichen Ansatzes anzugehen. Das Buch handelt von den bemerkenswerten Ähnlichkeiten in der Funktionsweise, in Organisation, Struktur und Dynamik von menschlichen

Körpern, Tumoren, Städten und Unternehmen, die all diese Phänomene als Variationen über ein einziges Thema erscheinen lassen. Eine allen gemeinsame Eigenschaft ist, dass sie hochkomplex sind und aus sehr vielen einzelnen Komponenten, seien es Moleküle, Zellen oder menschliche Individuen, bestehen, die durch vernetzte Strukturen über mehrere räumliche und zeitliche Größenordnungen hinweg interagieren. Einige dieser Netzwerke, wie unser Kreislaufsystem und das Straßennetz einer Stadt, sind sichtbar und materiell-konkret, während andere, etwa soziale Netzwerke, Ökosysteme und das Internet, eher abstrakter oder virtueller Natur sind.

Dieser umfassende Ansatz erlaubt uns, ein faszinierendes Spektrum von Fragen in Angriff zu nehmen, von denen einige meine Forschungsinteressen beeinflusst haben und – auf manchmal spekulative Weise – in den folgenden Kapiteln behandelt werden. Hier eine Auswahl:

- Warum können wir bis zu 120 Jahre alt werden, aber nicht 1000 oder eine Million? Warum sterben wir überhaupt, und was begrenzt unsere Lebenserwartung? Kann diese aus den Eigenschaften der Zellen und der komplexen Moleküle errechnet werden, aus denen unser Körper besteht? Wenn ja, können diese Eigenschaften verändert und kann dadurch unsere Lebenserwartung gesteigert werden?
- Warum leben Mäuse, die aus mehr oder minder demselben Stoff gemacht sind wie wir, nur zwei oder drei Jahre, Elefanten aber bis zu 75? Und warum ist trotz dieser Differenz die Anzahl der Herzschläge über die gesamte Lebensspanne bei Elefanten, Mäusen und – mit einer Ausnahme – allen anderen Säugetieren mit ungefähr 1,5 Milliarden annähernd gleich groß?
- Warum skalieren Organismen und Ökosysteme, von Körperzellen bis hin zu Wäldern, in bemerkenswert einheitlicher, systematischer und voraussagbarer Weise? Wie kommt es zu der magischen Zahl 4, die einen Großteil der Physiologie und der Lebensgeschichte dieser Phänomene – Wachsen und Zugrundegehen – zu beherrschen scheint?
- Warum wachsen wir irgendwann nicht mehr weiter? Warum müssen wir jeden Tag acht Stunden schlafen? Und warum erkranken wir viel seltener an Tumoren als Mäuse, Wale aber fast nie?

- Warum halten sich fast alle Unternehmen nur relativ wenige Jahre, während Städte immer weiter wachsen und dem Schicksal entgehen, das selbst marktbeherrschende, scheinbar unverwundbare Unternehmen ereilt? Können wir die ungefähre Lebenserwartung von Unternehmen voraussagen?
- Können wir eine Wissenschaft von Städten und Unternehmen erarbeiten, die ihre Dynamik, ihr Wachstum und ihre Entwicklung in quantitativ voraussagbarer Weise versteht?
- Gibt es eine maximale Größe von Städten? Oder eine optimale Größe? Gibt es eine maximale Größe von Pflanzen und Tieren? Könnte es riesige Insekten und gigantische Megastädte geben?
- Warum wird das Leben immer schnelllebiger, und warum muss sich die Innovationsrate weiter beschleunigen, um sozioökonomisches Leben aufrechtzuerhalten?
- Wie lässt sich sicherstellen, dass unsere menschengemachten Systeme, die sich erst in den letzten zehntausend Jahren entwickelt haben, weiterhin mit der Jahrmilliarden alten natürlichen biologischen Welt koexistieren können? Können wir dynamische, innovative, von Ideen und der Schaffung von Wohlstand lebende Gesellschaften bleiben, oder sind wir dazu verurteilt, dereinst auf einem verwüsteten, von Slums und Konflikten beherrschten Planeten zu leben?

Bei der Behandlung von Fragen wie diesen werde ich in transdisziplinärem Geist Ideen aus verschiedenen Wissenschaften zusammenführen. Ich werde grundlegende Fragen der Biologie mit solchen der Sozial- und der Wirtschaftswissenschaften in Beziehung setzen, und das frank und frei aus der Perspektive und mit den Augen eines Vertreters der theoretischen Physik. Dabei werde ich auch die wegweisende Rolle ansprechen, die derselbe Skalierungsansatz bei der Entwicklung eines ganzheitlichen Bildes von den Elementarteilchen und den Fundamentalkräften der Natur gespielt hat. Deren Bedeutung für die Entstehung des Universums nach dem Urknall wird dabei nicht unerwähnt bleiben. Wo es angebracht ist, werde ich in diesem Geist auch spekulativ und provokativ sein. In der Hauptsache basiert jedoch fast alles, was ich darstelle, auf etablierten wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Obwohl viele oder gar die meisten dargestellten Forschungsergebnisse ihren Ursprung in Beweisen und Herleitungen haben, die in der Sprache der Mathematik formuliert sind, ist das Buch im Geiste dezidiert nichttechnisch; es ist didaktisch und für den sprichwörtlichen «intelligenten Laien» geschrieben. Ein gewisses Maß an dichterischer Freiheit muss daher in Kauf genommen werden, und ich bitte meine Kollegen aus der Wissenschaft, nicht allzu kritisch zu sein, wenn sie glauben, meine Übersetzung der mathematischen oder fachspezifischen Sprache in die Umgangssprache habe die Dinge allzu sehr vereinfacht. Leser mit Affinität zur Mathematik verweise ich auf die in den Endnoten angegebene technische Literatur.

## 2. WIR LEBEN IN EINER EXPONENTIELL WACHSENDEN SOZIOÖKONOMISCHEN URBANISIERTEN WELT

Ein zentrales Thema des Buches ist die überragende Bedeutung, die Städte für die Zukunft der Erde haben. Die Städte sind zur Quelle der größten Probleme geworden, vor die die Menschen den Planeten gestellt haben, seit sie in Gesellschaften leben. Die Zukunft der Menschheit und der Erde ist untrennbar mit dem Schicksal unserer Städte verbunden. Die Städte sind die Schmelztiegel der Zivilisation, die Drehscheiben der Innovation, die Motoren für die Schaffung von Wohlstand, die Zentren der Macht und die Magneten, die die kreativen Individuen anziehen. Sie haben aber auch eine Schattenseite: Vor allem in ihnen sind Armut, Krankheit und Kriminalität zu Hause, sie verbrauchen am meisten Energie und Ressourcen und verschmutzen die Umwelt am meisten. Die rasante Urbanisierung und die sich beschleunigende sozioökonomische Entwicklung haben zu vielfältigen globalen Problemen geführt, vom Klimawandel und seinen Folgen für die Umwelt bis zu den noch am Anfang stehenden Krisen beim Zugang zu Nahrung, Energie und Wasser, im Gesundheitswesen, auf den Finanzmärkten und in der Weltwirtschaft.

Angesichts dieser Doppelnatur der Städte als einerseits der Quelle vieler unserer größten Probleme und andererseits des Reservoirs von Kreativität und damit der Quelle für die Lösung jener Probleme drängt sich die Frage auf, ob es eine «Städtewissenschaft» geben kann, die es erlaubt, Dynamik, Wachstum und Entwicklung von Städten zu analysieren und vorauszusagen. Für den Entwurf einer seriösen Strategie zur Sicherung langfristiger Nachhaltigkeit wäre dies von entscheidender Bedeutung, insbesondere deshalb, weil die überwältigende Mehr-

heit der Menschen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts in Städten wohnen wird, viele von ihnen in Millionenstädten von nie dagewesener Größe.

Keine der Herausforderungen und Gefahren, denen wir uns gegenübersehen, ist neu. Sie alle waren uns zumindest seit den Anfängen der industriellen Revolution gegenwärtig, und nur aufgrund des exponentiellen Tempos der Urbanisierung erscheinen sie uns seit kurzem wie ein Tsunami, der uns unter sich zu begraben droht. Es liegt in der Natur einer exponentiellen Expansion, dass die Zukunft uns immer schneller erreicht und vor oft unvorhergesehene Probleme stellt, deren Gefährlichkeit wir erst erkennen, wenn es zu spät ist. So sind wir uns erst in jüngerer Zeit der Erderwärmung bewusst geworden, der langfristigen Veränderungen der Umwelt, der Umweltverschmutzung und der darin liegenden Gefahren auch für unsere Gesundheit, der Endlichkeit der Vorräte an Energie, Wasser und anderen Ressourcen, der Instabilität der Finanzmärkte und so weiter. Und selbst nachdem wir begonnen hatten, uns diesen Herausforderungen zu stellen, haben wir immer noch geglaubt, es handle sich um vorübergehende Fehlentwicklungen, die korrigiert werden würden. Insofern überrascht es nicht, dass die meisten Politiker und Ökonomen weiterhin ziemlich optimistisch sind und annehmen, auf lange Sicht würden wie in der Vergangenheit unser Einfallstreichtum und unsere Fähigkeit zur Innovation triumphieren. Ich bin da nicht so sicher und werde dies an späterer Stelle begründen.

Seit es uns gibt und bis vor relativ kurzer Zeit haben die meisten Menschen in nichtstädtischen Umgebungen gelebt. Noch vor zweihundert Jahren waren die Vereinigten Staaten im Wesentlichen ein Agrarland: Nur vier Prozent der Bevölkerung lebten in Städten, während es heute mehr als 80 Prozent sind. Ähnliches gilt für fast alle entwickelten Länder, wie Frankreich, Australien und Norwegen, aber auch für viele, die noch nicht so weit sind, wie etwa Argentinien, der Libanon und Libyen. Es gibt heute auf der Erde kein einziges Land mehr, dessen Bevölkerung zu nur vier Prozent in Städten lebt; selbst Burundi, vielleicht das ärmste und am wenigsten entwickelte Land, ist zu mehr als zehn Prozent urbanisiert. 2006 überschritt der Planet eine bemerkenswerte historische Schwelle: In diesem Jahr lebte erstmals mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in urbanen Zentren – 1950 waren es nur 30 Prozent und Anfang des 20. Jahrhunderts gar nur 15 Prozent gewesen. Es wird erwartet, dass diese Quote bis 2050 auf über 75 Prozent steigen wird, weil weitere gut zwei Milliarden Menschen, vor allem in China, Indien, Südostasien und Afrika, in die Städte ziehen werden.<sup>8</sup>

Zwei Milliarden – das ist eine gewaltige Zahl. Sie besagt, dass in den nächsten gut dreißig Jahren im Durchschnitt *wöchentlich* ungefähr eineinhalb Millionen

Menschen in die Städte ziehen werden. Stellen Sie sich vor, was das bedeutet: Heute ist der 24. August; bis zum 24. Oktober wird es auf dem Planeten das Äquivalent eines weiteren New Yorker Ballungsraumes geben, bis Weihnachten noch eines, bis 24. Februar ein drittes, und so weiter ... Von heute an bis Mitte des Jahrhunderts wird die Erde unausweichlich etwa alle zwei Monate durch einen weiteren New Yorker Großraum «bereichert», wobei wir wohlgemerkt von 15 Millionen Menschen sprechen, nicht nur von den 8 Millionen, die New York City an Einwohnern hat.

Das vielleicht erstaunlichste und ehrgeizigste Urbanisierungsprogramm auf dem Planeten läuft in China, wo die Regierung im Eiltempo in den nächsten 20 bis 25 Jahren bis zu 300 neue Millionenstädte aus dem Boden stampfen will. Bisher war China in Sachen Urbanisierung und Industrialisierung langsam, jetzt aber macht das Land verlorene Zeit wieder wett. Nachdem das Reich der Mitte noch 1950 zu nur zehn Prozent urbanisiert war, hat es im vergangenen Jahr die Marke von 50 Prozent überschritten. Beim gegenwärtigen Tempo werden in den nächsten 20 bis 25 Jahren mehr als 300 Millionen Menschen, das heißt so viele, wie die Vereinigten Staaten an Einwohnern haben, in Städte ziehen. Und Indien und Afrika stehen dem kaum nach. Es wird die bei weitem größte Wanderungsbewegung von Menschen sein, die es auf dem Planeten je gegeben hat. Sie wird aber sehr wahrscheinlich einmalig bleiben. Die sich daraus ergebenden Probleme für den Zugang zu Energie und Rohstoffen und die enormen Belastungen für das soziale Gefüge auf der ganzen Welt machen schon in der Vorstellung schwindelig, werden aber in kurzer Zeit bewältigt werden müssen. Und jeder wird davon betroffen sein.

### 3. LEBEN UND TOD

Das unbegrenzte exponentielle Wachstum der Städte steht in Gegensatz zu dem, was wir in der Welt der Biologie sehen: Die meisten Organismen, uns eingeschlossen, wachsen schnell, wenn sie jung sind, dann immer langsamer, bis sie überhaupt nicht mehr wachsen und schließlich sterben. Die meisten Unternehmen haben eine ähnliche Geschichte; fast alle verschwinden irgendwann. Nicht so jedoch die meisten Städte. Trotzdem werden sowohl auf Städte als auch auf Unternehmen oftmals biologische Begriffe angewendet. So ist häufig von der «DNA des Unternehmens» zu lesen, vom «Stoffwechsel der Stadt» und von der «Ökologie des Marktes». Sind das nur Metaphern, oder verweisen sie auf eine

reale wissenschaftliche Substanz? Sind Städte und Unternehmen, die ja gleichermaßen biologische Wurzeln und somit viele gemeinsame Merkmale haben, riesige Organismen, und, wenn ja, inwieweit?

Städte haben natürlich auch Eigenschaften, die *nicht* biologischer Natur sind; ich komme später darauf zu sprechen. Wenn Städte aber tatsächlich eine Art von Superorganismen sind, warum stirbt dann nur selten eine? Sicher gibt es klassische Beispiele für untergegangene Städte, vor allem in der Antike. Aber das sind meistens Sonderfälle: Untergegangen sind diese Städte infolge kriegerischer Auseinandersetzungen oder des zerstörerischen Umgangs mit ihrer unmittelbaren Umwelt. Sie machen nur einen winzigen Bruchteil all jener Städte aus, die es je gegeben hat. Städte sind bemerkenswert robust, und die große Mehrheit hält sich. Denken Sie an das furchtbare Experiment von vor mehr als siebenzig Jahren, als auf Hiroshima und Nagasaki Atombomben abgeworfen wurden: Nur dreißig Jahre später blühten die beiden Städte wieder! Es ist äußerst schwierig, eine Stadt zu töten, während es relativ leicht ist, Tiere und Unternehmen zu töten – selbst die Letzteren sterben fast alle, auch die marktbeherrschenden und scheinbar unverwundbaren. Und was den Menschen betrifft: Trotz der Zunahme unserer *durchschnittlichen* Lebenserwartung in den letzten zweihundert Jahren hat sich unsere *maximale* Lebenserwartung nicht verändert. Kein Mensch ist je älter geworden als 123 Jahre. Viel länger leben aber auch nur sehr wenige Unternehmen; die meisten sind schon nach zehn Jahren verschwunden. Warum also bleiben fast alle Städte lebensfähig, während jeder Organismus und fast jedes Unternehmen stirbt?

Der Tod ist integraler Bestandteil allen biologischen und sozioökonomischen Lebens: Fast alles, was lebt, stirbt irgendwann, aber im Unterschied zu Geburt und Leben wird der Tod als Gegenstand ernsthafter Betrachtung sowohl von der Gesellschaft als auch von der Wissenschaft vernachlässigt und tendenziell verdrängt. Auf persönlicher Ebene habe ich erst mit Anfang fünfzig begonnen, ernsthaft über Altern und Sterben nachzudenken. Ich hatte meine zwanziger, dreißiger und vierziger Jahre durchlebt, ohne mir groß Gedanken über meine Sterblichkeit zu machen, und hatte damit unbewusst am Glauben aller «jungen» Leute festgehalten, unsterblich zu sein. Doch ich stamme aus einer Familie, in der die Männer nicht lange gelebt haben, und so war es vielleicht unvermeidlich, dass mir irgendwann in meinen Fünfzigern dämmerte, ich könnte in fünf bis zehn Jahren tot sein, und sollte klugerweise anfangen, darüber nachzudenken, was das bedeutet.

Ich vermute, dass jede Religion und philosophische Reflexion ihren Ursprung

in der Frage hat, wie wir die Unvermeidlichkeit des Todes in unser tägliches Leben integrieren können. Und so fing auch ich an, über Altern und Sterben nachzudenken und Bücher über dieses «weite Feld» zu lesen, und zwar zunächst aus persönlicher, psychologischer, religiöser und philosophischer Perspektive. Das war äußerst interessant, bescherte mir aber mehr Fragen als Antworten. Also begann ich, auch aufgrund von Ereignissen, die ich an späterer Stelle erzählen werde, diese Fragen wissenschaftlich zu reflektieren, was mich auf eine Fährte brachte, die sowohl mein Privat- als auch mein Berufsleben veränderte.

Als Physiker über Altern und Sterben nachzudenken bedeutet nicht nur, nach den Mechanismen zu fragen, aufgrund derer wir altern und sterben, sondern auch, nach den Gründen für die maximale Lebenserwartung des Menschen zu forschen. Warum ist niemand jemals älter als 123 Jahre geworden? Worauf basiert die Rede des Alten Testaments von den siebzig Jahren, die das menschliche Leben währt? Könnten wir vielleicht tausend Jahre leben, wie der mythische Methusalem? Und warum leben die meisten Unternehmen nur einige wenige Jahre? Die Hälfte aller börsennotierten Unternehmen in den Vereinigten Staaten ist spätestens zehn Jahre nach Markteintritt wieder verschwunden. Zwar lebt eine kleine Minderheit beträchtlich länger, doch scheinen fast alle dazu verurteilt, den Weg von German Wings, Studebaker und Lehman Brothers zu gehen. Warum? Ist es möglich, eine seriöse mechanistische Theorie zu erarbeiten, die nicht nur *unsere* Sterblichkeit, sondern auch die von Unternehmen zu verstehen erlaubt? Ist es vorstellbar, dass wir dereinst in der Lage sind, die Prozesse des Alterns und des Niedergangs von Unternehmen zu quantifizieren und dadurch deren ungefähre Lebenserwartung «vorauszusagen»? Und warum gelingt es Städten, dem Schicksal von Unternehmen zu entgehen?

#### 4. ENERGIE, STOFFWECHSEL UND ENTROPIE

Wenn man sich mit diesen Fragen beschäftigt, wird man vielleicht auch wissen wollen, woher all die anderen Größenverhältnisse des Lebens kommen. Warum etwa schlafen wir ungefähr acht Stunden am Tag, während Mäuse fünfzehn schlafen und Elefanten nur vier? Warum sind die höchsten Bäume nur gut hundert Meter hoch und nicht einen Kilometer? Warum wachsen die größten Unternehmen nicht mehr weiter, wenn ihr Wert die Marke von einer halben Billion Dollar erreicht hat? Und warum enthält jede unserer Zellen ungefähr fünfhundert Mitochondrien?

Um solche Fragen beantworten und um Prozesse wie Altern und Sterben mechanistisch verstehen und quantifizieren zu können, ganz gleich, ob es um Menschen, Elefanten, Städte oder Unternehmen geht, müssen wir zunächst wissen, wie diese Systeme entstanden sind und wie sie am Leben bleiben. In der Welt der Biologie werden Systeme durch den Stoffwechsel am Leben erhalten. Quantitativ wird dieser als *Stoffwechselrate* beziffert, als Menge an Energie, die pro Sekunde benötigt wird, um einen Organismus am Leben zu erhalten; bei uns beträgt sie pro Tag etwa 2000 Kalorien, was einer Rate von lediglich ca. 90 Watt entspricht, dem Energieverbrauch einer Glühfadenlampe. Wie aus Abbildung 1 zu ersehen ist, hat unsere Stoffwechselrate den «korrekten» Wert für ein Säugetier unserer Größe. Sie ist die *biologische* Stoffwechselrate von Menschen als natürlichen, animalischen Lebewesen. Auch als gesellige, mittlerweile in Städten lebende Tiere benötigen wir an Nahrung, um am Leben zu bleiben, nur das Äquivalent des Energieverbrauchs einer Glühbirne, zusätzlich aber Wohnungen, Heizung, künstliches Licht, Autos, Straßen, Flugzeuge, Computer und so weiter. Daher ist die durchschnittliche Menge an Energie, die nötig ist, um einem Menschen das Leben in den Vereinigten Staaten zu ermöglichen, auf erstaunliche 11 000 Watt gestiegen. Diese *soziale* Stoffwechselrate entspricht dem Energieverbrauch von einem Dutzend Elefanten. Außerdem ist die menschliche Gesamtpopulation infolge des Übergangs vom Biologischen zum Sozialen von nur wenigen Millionen auf mehr als sieben Milliarden angewachsen. Kein Wunder, dass uns eine Energie- und Rohstoffkrise droht!

Keines der genannten Systeme, ob natürlich oder menschengemacht, kommt ohne permanente Zufuhr von Energie und Rohstoffen aus, die in etwas «Nützliches» umgewandelt werden müssen. In Anlehnung an den biologischen Begriff bezeichne ich all diese Prozesse der Energieumwandlung als *Stoffwechsel*. Je nach Entwicklungsstufe des Systems wird die gewonnene nützliche Energie in verschiedenen Relationen für körperliche Arbeit, Instandhaltung, Wachstum und Reproduktion verwendet. Als soziale Wesen nutzen wir – im Gegensatz zu allen anderen Geschöpfen – den größten Teil unserer Stoffwechselenergie für die Bildung von Gemeinschaften und Institutionen wie Dörfern, Städten, Unternehmen und Verbänden, für die Herstellung einer großen Mannigfaltigkeit von dinglichen Artefakten wie Kathedralen, Flugzeugen und Handys und für die Hervorbringung einer staunenswert langen Liste von geistigen Gebilden wie der Mathematik und der Musik, um nur einige zu nennen.

Dass es ohne permanente Zufuhr von Energie und Rohstoffen nicht nur keine dinglichen Artefakte, sondern, was vielleicht noch wichtiger ist, auch keine

Ideen, keine Innovation, kein Wachstum und keine Entwicklung geben kann, wird oft nicht klar gesehen. Es ist erstaunlich, wie gering die Bedeutung ist, die der allgemeine Begriff der Energie für das konzeptionelle Denken von Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern hat – wenn er überhaupt eine hat. Aber ohne Energie geht gar nichts. Sie ist Voraussetzung von allem und jedem, was wir tun und was um uns herum geschieht. Ihre Bedeutung für alle Fragen, die ich erörtern werde, wird daher ein weiterer durch das ganze Buch laufender roter Faden sein.

Wenn Energie verarbeitet wird, hat das immer seinen Preis; es gibt im Leben nichts umsonst. Und da beim «Betrieb» eines jeden Systems immer auch Energie verarbeitet wird, hat dieser Betrieb Folgen. Es gibt sogar ein einschlägiges fundamentales, als *Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik* formuliertes Naturgesetz, das nicht außer Kraft gesetzt werden kann und das besagt, dass bei jeder nützlichen Umwandlung von Energie «unnütze» Energie als Abbau- und Abfallprodukt entsteht. Das heißt, «unbeabsichtigte Folgen» in Form von unverwendbarer desorganisierter Hitze oder unbrauchbaren Produkten sind unvermeidlich. Es gibt kein Perpetuum mobile. Um am Leben zu bleiben und die hochorganisierte Funktionalität von Geist und Körper aufrechtzuerhalten, müssen Sie essen. Aber wenn Sie gegessen haben, müssen Sie früher oder später auf die Toilette. Das ist die materielle Manifestation Ihrer persönlichen Entropie-Produktion.

Der deutsche Physiker Rudolf Clausius hat für dieses Phänomen, das stets als Folge der Interaktion von Dingen durch den Austausch von Energie und Rohstoffen auftritt, 1855 den Begriff der *Entropie* geprägt (das Wort ist übrigens die griechische Entsprechung von *Umwandlung* und *Entwicklung*). Wann immer Energie verbraucht oder verarbeitet wird, um in einem geschlossenen System Ordnung herzustellen oder aufrechtzuerhalten, lässt sich ein gewisses Maß an Unordnung nicht vermeiden. Daher wächst die Entropie beständig. Damit Sie nicht glauben, es gebe Ausnahmen von der Geltung dieses Gesetzes, sei Einstein zitiert: Die klassische Thermodynamik «ist die einzige physikalische Theorie allgemeinen Inhalts, von der ich überzeugt bin, dass sie im Rahmen der Anwendbarkeit ihrer Grundbegriffe niemals umgestoßen wird». «Die einzige», das heißt, dass Einstein sich nicht einmal der ewigen Geltung der von ihm selbst aufgestellten Relativitätstheorie sicher war!

Wie der Tod, die Steuern und das Schwert des Damokles, so hängt auch der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik über uns allen und über allem, was uns umgibt. Energieverlust, wie bei der Produktion von desorganisierter Hitze durch Reibung, ist unvermeidlich und führt zur Schwächung aller Systeme. Selbst die

genialste Maschine, das bestorganisierte Unternehmen, der schönste Organismus entgeht nicht diesem unerbittlichsten aller unerbittlichen Schnitter. Das Aufrechterhalten von Ordnung in einem sich entwickelnden System erfordert die permanente Zufuhr und den permanenten Verbrauch von Energie, und als Nebenprodukt entsteht Unordnung. Darum müssen wir immer wieder essen, um die unentrinnbaren zerstörerischen Kräfte der Entropieproduktion zu bekämpfen und am Leben zu bleiben. Letztlich aber tötet Entropie. Letztlich unterliegen wir alle den Kräften der Abnutzung in ihren zahlreichen Erscheinungsformen. Der Kampf gegen die Entropie durch permanente Zufuhr von Energie für Instandhaltung, Innovation und Wachstum, dieser Kampf, der mit dem Altern eines Systems immer schwieriger wird, ist die Grundlage jeder seriösen Diskussion über Altern, Sterblichkeit, Belastbarkeit und Zukunftsfähigkeit, sei es von Organismen, Unternehmen oder Gesellschaften.

## 5. ES KOMMT WIRKLICH AUF DIE GRÖSSE AN: SKALIERUNG UND NICHTLINEARES VERHALTEN

Die Perspektive, die ich bei Betrachtung dieser verschiedenen und scheinbar miteinander nicht zusammenhängenden Fragen hauptsächlich nutzen werde, ist die einer Wissenschaft der Skalierung. Diese Wissenschaft befasst sich damit, wie sich Phänomene bei Größenveränderung verhalten. Die fundamentalen Regeln und Prinzipien, denen sie dabei unterliegen, sind zentrale Themen des Buches und Ausgangspunkte für die Entfaltung fast aller Thesen, die ich aufstellen werde. Aus dieser Perspektive offenbaren Städte, Unternehmen, Pflanzen, Tiere, unsere Körper und sogar Tumoren eine bemerkenswerte Ähnlichkeit in der Art und Weise, wie sie organisiert sind und funktionieren. Jedes dieser Phänomene variiert in seiner Organisation, Struktur und Dynamik auf faszinierende Weise ein universales Thema, das sich in erstaunlich strengen mathematischen Gesetzmäßigkeiten niederschlägt. Ich werde zeigen, dass diese Gesetzmäßigkeiten durch einen konzeptionellen Ansatz sichtbar gemacht werden können, der die sehr verschiedenen Systeme aus ein und derselben Perspektive zu betrachten und viele große Probleme zu analysieren und in Angriff zu nehmen erlaubt.

*Skalierung* macht in ihrer elementarsten Form schlicht und einfach deutlich, wie ein System auf eine Änderung seiner Größe reagiert. Was geschieht mit einer Stadt oder einer Firma, wenn sie doppelt so groß wird? Wie konzipiert man ein Gebäude oder ein Flugzeug, das nur halb so groß sein soll, im Detail? Welche

Folgen hat es, wenn eine Volkswirtschaft auf die Hälfte schrumpft? Weist eine Stadt, deren Einwohnerzahl sich verdoppelt hat, ungefähr doppelt so viele Straßen, doppelt so viel Kriminalität und doppelt so viele erworbene Patente auf? Verdoppelt sich der Gewinn eines Unternehmens, wenn sich sein Umsatz verdoppelt? Und benötigt ein Tier, das halb so groß ist wie ein anderes, auch nur halb so viel Nahrung?

Die Beschäftigung mit der scheinbar belanglosen Frage nach der Art und Weise, wie Systeme auf eine Änderung ihrer Größe reagieren, hat bemerkenswert weitreichende Konsequenzen für das gesamte Spektrum der Wissenschaften, des Ingenieurwesens und der Technologie gehabt und sich damit auf fast jeden Aspekt unseres Lebens ausgewirkt. Skalenberechnungen haben zu einem besseren Verständnis chaotischer Phänomene (wie des berühmten «Schmetterlingseffekts», bei dem der Flügelschlag eines Schmetterlings in Brasilien einen Hurrikan in Florida auslöst), aber auch der Dynamik von Phasenübergängen (wie dem Gefrieren von Flüssigkeiten zu Festkörpern und ihrem Verdampfen zu Gasen) sowie der Entstehung des Universums nach dem Urknall geführt, zur Entdeckung der Quarks (der Bausteine der Materie) und zur Zusammenführung der Fundamentalkräfte der Natur. Dies sind nur einige wenige der spektakuläreren Beispiele dafür, dass Skalenberechnungen schon in der Vergangenheit zur Erhellung bedeutsamer allgemeiner Prinzipien und Strukturen beigetragen haben.<sup>9</sup>

In praktischen Zusammenhängen ist Skalierung von entscheidender Bedeutung bei der Konstruktion immer größerer Dinge im weitesten Sinne, seien es Gebäude, Brücken, Schiffe, Flugzeuge oder Computer, weil das (kosten-)effiziente Extrapolieren vom Kleinen zum Großen eine immer wieder von neuem zu bewältigende Herausforderung ist. Noch schwieriger und vielleicht noch dringlicher ist das Skalieren der Strukturen immer größerer und komplexerer sozialer Organisationen, seien es Unternehmen, Konzerne, Städte oder Staaten, da es sich hierbei um adaptive Systeme handelt, deren Grundprinzipien wir im Allgemeinen nicht gut verstehen.

Viel zu selten wird die Bedeutung gesehen, die das Skalieren für die Medizin hat. Ein Großteil der Erforschung von Krankheiten und der Entwicklung neuer Medikamente und Heilverfahren macht von Mäusen als «Modell»-Systemen Gebrauch. Damit stellt sich sogleich die Frage, wie die gewonnenen Erkenntnisse auf den Menschen übertragen werden können. Beispielsweise werden jährlich enorme Summen für die Erforschung von Krebs bei Mäusen ausgegeben, obwohl eine normale Maus pro Gramm Gewebe viel mehr Tumoren entwickelt als wir. Das wirft die Frage nach der Relevanz dieser Forschungen für den Menschen

auf. Wenn solche Studien dazu führen sollen, dass wir Krebs beim Menschen besser verstehen und erfolgreicher behandeln können, dann müssen wir wissen, wie wir verlässlich von Mäusen auf Menschen hochskalieren und umgekehrt von Walen, die fast keine Tumoren entwickeln, auf Menschen herunterskalieren können. Ich werde hierauf und auf die als «Petos Paradoxon» bezeichnete Schwierigkeit zu sprechen kommen, wenn ich Skalierungsprobleme in Biomedizin und Gesundheitswesen behandle.

Um sicherzustellen, dass wir alle auf demselben Stand sind, wenn die Reise beginnt, möchte ich einige Termini einführen und auf geläufige Begriffe eingehen, über deren genaue Bedeutung häufig Missverständnisse vorhanden sind.

Zunächst noch einmal die einfache Frage, die ich oben schon formuliert habe: Benötigt ein Tier, das halb so groß ist wie ein anderes, nur halb so viel Nahrung? Sie erwarten vielleicht ein «Ja» als Antwort, da bei halbem Gewicht nur halb so viele Zellen ernährt werden müssen. Ein «Ja» würde also bedeuten, dass für halb so groß halb so viel nötig sei, für doppelt so groß doppelt so viel und so weiter: ein einfaches Beispiel für klassisches *lineares* Denken. Doch erstaunlicherweise ist es nicht immer leicht, lineares Denken zu erkennen – trotz seiner offenkundigen Einfachheit –, da es oft eher implizit als explizit am Werk ist.

So wird meist nicht erkannt, dass sich im allgegenwärtigen Gebrauch von Pro-Kopf-Raten, um Rankings von Städten, Unternehmen, Ländern oder Volkswirtschaften aufzustellen, auf subtile Weise lineares Denken manifestiert. Ein einfaches Beispiel: Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) der Vereinigten Staaten wurde 2013 auf ca. 50 000 Dollar pro Kopf geschätzt, was bedeutete, dass auf die gesamte Volkswirtschaft gesehen im Durchschnitt jeder Bürger «Güter» im Wert von ca. 50 000 Dollar produziert hatte. Die Großstadt Oklahoma City mit ungefähr 1,2 Millionen Einwohnern hat ein BIP von ca. 60 Milliarden Dollar, so dass das Pro-Kopf-BIP der Stadt (60 Milliarden Dollar, geteilt durch 1,2 Millionen) dem Durchschnitt für die Vereinigten Staaten, also ca. 50 000 Dollar, nahekommt. Wenn man diese Zahlen extrapoliert, kommt man zu dem Ergebnis, dass eine Stadt mit zehnmal so vielen Einwohnern ein BIP von ca. 600 Milliarden Dollar haben wird (50 000 Dollar pro Kopf  $\times$  12 Millionen Einwohner), also zehnmal so viel wie Oklahoma City. Die Großstadt Los Angeles, die mit 12 Millionen Einwohnern tatsächlich zehnmal so groß ist wie Oklahoma City, hat jedoch ein BIP von mehr als 700 Milliarden Dollar, das heißt gut 16 Prozent mehr als den durch lineare Extrapolation einer Pro-Kopf-Rate errechneten Wert.

Das ist natürlich nur *ein* Beispiel, und vielleicht meinen Sie, ich hätte einen Sonderfall herangezogen: Los Angeles sei einfach reicher als Oklahoma City.

Letzteres ist zwar wahr, aber Statistiker wissen, dass der zu niedrige Schätzwert für Los Angeles, der sich aus der Extrapolation der Werte von Oklahoma City ergab, kein Sonderfall ist, sondern im Gegenteil ein Beispiel für einen allgemeinen, bei Städten auf der ganzen Welt sich bestätigenden Befund, dass das lineare Extrapolieren von Pro-Kopf-Raten fast nie zu korrekten Ergebnissen führt. Wie fast jedes andere quantifizierbare Merkmal von Städten, ja fast jedes andere komplexe System, so skaliert auch das BIP im Allgemeinen *nichtlinear*. Was das bedeutet und welche Folgen es hat, werde ich an späterer Stelle genauer erläutern. Bis dahin genügt es zu wissen, dass sich die messbaren Eigenschaften eines Systems bei nichtlinearem Verhalten im Allgemeinen nicht einfach verdoppeln, wenn seine Größe sich verdoppelt. In Bezug auf das obige Beispiel kann das auch so formuliert werden, dass mit wachsender Einwohnerzahl einer Stadt ein Wachstum nicht nur des Pro-Kopf-BIP, sondern auch des Durchschnittslohns, der Kriminalitätsrate und vieler anderer messbarer städtischer Größen einhergeht. Hierin kommt ein Wesensmerkmal aller Städte zum Ausdruck, nämlich dass mit wachsender Einwohnerzahl auch soziale Aktivität und ökonomische Produktivität wachsen, und zwar *stetig*. Dieser mit zunehmender Größe verbundene wachsende «Mehrwert» wird von Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlern als *wachsender Skalenertrag* bezeichnet, während Physiker den in ihren Augen attraktiveren Begriff der *superlinearen Skalierung* vorziehen.

Ein bedeutsames Beispiel für nichtlineare Skalierung findet sich in der biologischen Welt, wenn wir die Menge an Nahrung und Energie betrachten, die Tiere (uns eingeschlossen) jeden Tag konsumieren, um am Leben zu bleiben. Erstaunlicherweise benötigt ein Tier, das doppelt so groß ist wie ein anderes und aus ungefähr doppelt so vielen Zellen besteht, täglich nicht etwa 100 Prozent mehr Nahrung und Energie, wie man aufgrund linearer Extrapolation erwarten könnte, sondern nur ungefähr 75 Prozent mehr. Eine 60 kg schwere Frau benötigt im Durchschnitt täglich ca. 1300 Kalorien, um am Leben zu bleiben, sofern sie auf alle Aktivitäten verzichtet (Biologen und Mediziner sprechen von der *Basalstoffwechselrate* und unterscheiden sie von der *Aktivstoffwechselrate*, die den Kalorienbedarf für alle Aktivitäten des Lebens beinhaltet). Der große Schäferhund der Frau, der nur halb so viel wiegt wie sie, nämlich 30 kg, und nur ungefähr halb so viele Zellen hat, sollte daher, wird man erwarten, auch nur ungefähr halb so viel Nahrung und Energie, also ca. 650 Kalorien täglich, benötigen, um am Leben zu bleiben. Tatsächlich benötigt er aber ca. 800 Kalorien.

Obwohl ein Hund keine kleine Frau ist, illustriert das Beispiel das allgemeine Skalierungsgesetz für die Abhängigkeit der Stoffwechselrate vom Körpergewicht.

Dieses Gesetz ist für alle Säugetiere gültig, von der Spitzmaus, die nur einige Gramm wiegt, bis zum Blauwal, der mehr als das Hundertmillionenfache wiegt. Aus ihm folgt, dass das größere Tier effizienter ist als das kleinere, da zur Unterhaltung jedes Gramms seines Gewebes weniger Energie (im Beispiel ungefähr 25 Prozent weniger) benötigt wird. Hätte die Frau ein Pferd, so wäre dieses noch effizienter. Die Einsparungen bei zunehmender Größe werden als *Skaleneffekte* bezeichnet. Prägnant ausgedrückt besagt das Gesetz, dass Tiere, um am Leben zu bleiben, pro Zelle oder Gramm Gewebe umso weniger benötigen, je größer sie sind. Während für den *wachsenden Skalenertrag* bzw. die *superlineare Skalierung* etwa des BIP von Städten gilt: je größer, umso mehr, ist es beim *Skaleneffekt* umgekehrt: je größer, umso weniger. Diese Form der Skalierung wird als *sublineare Skalierung* bezeichnet.

Größe und nichtlineare Skalierung sind bedeutsame Determinanten des allgemeinen Verhaltens hochkomplexer, sich entwickelnder Systeme, und so wird sich das Buch über weite Strecken mit den Gründen für dieses nichtlineare Verhalten befassen und – anhand von Beispielen aus Naturwissenschaft, Technologie, Volkswirtschaftslehre und Geschäftswelt, aber auch aus dem täglichen Leben, der Sciencefiction und dem Sport – der Frage nachgehen, wie seine Gesetzmäßigkeiten für die Lösung von Problemen genutzt werden können.

---

Mehr Informationen zu [diesem](#) und vielen weiteren Büchern aus dem Verlag C.H.Beck finden Sie unter: [www.chbeck.de](http://www.chbeck.de)