

DIE  
ANDERS  
LEVERMANN

FALTUNG

DER

WELT

Wie die **WISSENSCHAFT** helfen kann,  
dem **WACHSTUMSDILEMMA** und  
der **KLIMAKRISE** zu entkommen

ullstein 

Anders Levermann

*Die Faltung der Welt*

I could be bounded in a nutshell and  
count myself a king of infinite space.

SHAKESPEARE, HAMLET

**ANDERS LEVERMANN**

# **DIE FALTUNG DER WELT**

Wie die Wissenschaft helfen  
kann, dem Wachstumsdilemma und  
der Klimakrise zu entkommen

Ullstein

**Wir verpflichten uns zu Nachhaltigkeit**



- Papiere aus nachhaltiger Waldwirtschaft und anderen kontrollierten Quellen
- Druckfarben auf pflanzlicher Basis
- ullstein.de/nachhaltigkeit



Ullstein ist ein Verlag der Ullstein Buchverlage GmbH

ISBN: 978-3-550-20212-4

© 2023 by Ullstein Buchverlage GmbH, Berlin

Alle Rechte vorbehalten

Wir behalten uns die Nutzung unserer Inhalte für Text und  
Data Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor.

Gesetzt aus der Minion Pro

Satz: LVD GmbH, Berlin

Druck und Bindearbeiten: GGP Media GmbH, Pößneck

Für  
**Christiane**

Für  
**Shiva und Ole**  
und  
**Max und Mascha**



# Inhalt

<b>Prolog</b>	<b>11</b>
<b>1 Das Wachstumsdilemma</b>	<b>17</b>
<b>2 Das Prinzip der Selbstverstärkung</b>	<b>20</b>
2.1 Das Prinzip	22
2.2 Skalen und Grenzen	31
2.3 Abgrenzung und Clusterbildung	41
2.4 Grenzen, an die wir stoßen	47
<b>3 Die Faltungsgrenze des Klimas</b>	<b>54</b>
3.1 Eiszeit und Warmzeit	54
3.2 Strahlungsbilanz und Treibhauseffekt	55
3.3 Kippunkte und abrupte Übergänge	60
3.4 Was uns nicht droht	71
3.5 Was uns droht	74
3.6 Die Jetstream-Sorge	79
3.7 Die Freiheit unserer Kinder	85
3.8 Die Klimagrenze ist null	89
<b>4 Die Richtung des Fortschritts</b>	<b>92</b>
4.1 Das Gute am Wirtschaftswachstum	96
4.2 Die Wege, Selbstverstärkung zu begrenzen	106

<b>5 Das Konzept der Faltung</b>	115
5.1 Die mathematische Idee der Faltung	115
5.2 Sicherheit durch Chaos	119
5.3 Faltungsgrenzen	123
5.4 Faltung als Anpassung des Wertesystems	128
5.5 Faltungsgrenzen als Vision	131
5.6 Die beste Suchmaschine der Welt	135
5.7 Lösung des Dilemmas	139
5.8 Faltung als Wirtschaftsprinzip und Staatsräson	143
<b>6 Die Faltung der Produktion: Grenzen und Innovation</b>	152
6.1 Die Klimagrenze: Kein fossiler Kohlenstoff mehr	153
6.2 Kohlendioxid braucht eine Grenze und einen Preis	163
6.3 Faltung statt Verzicht	178
6.4 Die Lösung des Nachhaltigkeitsproblems	181
<b>7 Die Faltung der Wirtschaft: Wettbewerb und Vielfalt</b>	188
7.1 Too big to fail	189
7.2 Grenzen als Teil des Systems	196
7.3 Wachstum in die wirtschaftliche Vielfalt	202
7.4 Der Weg zur Vielfaltswirtschaft	205

<b>8 Die Faltung der Gesellschaft:</b>	
<b>Anreiz und Zusammenhalt</b>	211
8.1 Vermögenspyramide und Herrschaftsturm	211
8.2 Selbstverstärkung der Immobilienvermögen	220
8.3 Explodierende Vermögen gefährden die Gesellschaft	222
8.4 Explodierende Vermögen durch Vererbung begrenzen	226
8.5 Die Verhältnismäßigkeit des Einkommens	228
8.6 Noch eine Grenze, für Liebhaber: Ultra-Fast-Trading	232
8.7 Die Gesellschaft der Faltung	236
<b>9 Der Weg der Einigung</b>	239
9.1 Argumente für Kapitalisten	241
9.2 Argumente für Kommunisten	246
9.3 Argumente für die Nachhaltigkeit	249
9.4 Argumente für Pragmatiker	254
9.5 Worauf wir uns einigen können	258
<b>Großer Dank</b>	267
<b>Literatur</b>	269



# Prolog

We stick our fingers in the ground,  
heave and turn this world around.

TOM WAITS, HOIST THAT RAG

Nehmen wir einen Tischtennisball. Zunächst ist er nur ein einfacher Ball ohne Gefühle und Wünsche, aber wenn Sie bei mir bleiben, dann wird sich das bald ändern. Wäre dieser Ball im All, weit entfernt von der Erde und anderen schweren Körpern wie dem Mond oder gar der Sonne, dann flöge er mit gleicher Geschwindigkeit immer geradeaus.<sup>1</sup> Wenn wir uns in die mathematisch-physikalische Perspektive des Tischtennisballs begeben, dann interessiert uns nur, wo wir gerade sind und wo wir als Nächstes hinfliegen. Wir können uns ein Koordinatensystem bauen, in dem eine unserer Achsen immer nach vorne zeigt. Das geht, weil es eine Richtung gibt, die immer vorne ist. Und weil keine Kräfte auf den Tischtennisball wirken, ändert er seine Richtung nie. Er fliegt immer geradeaus. In seiner Welt nach vorne.

---

1 Für die Profis: Bevor wir den Tischtennisball in die Luftleere des Alls bringen, haben wir ihn natürlich mit einem kleinen Loch versehen, damit er nicht explodiert, wenn der Luftdruck von außen nachlässt.

Wir können den Tischtennisball etwas interessanter machen, indem wir ihm ein Wertesystem geben, das vorgibt: »Vorne ist gut, und weiter vorne ist besser.« Damit hätten wir in dieser luftleeren theoretischen Welt einen glücklichen Tischtennisball, denn er würde sich in jedem Moment verbessern. Aber selbst in dieser bis zur Absurdität vereinfachten Welt von emotionalen Tischtennisbällen im All kann Glückseligkeit nicht bis in alle Ewigkeit Bestand haben. Denn sogar im All mit seinen scheinbar unendlichen Weiten gibt es eine Grenze – die des Universums. Und noch bevor unser glücklicher Ball diese erreicht, wird er mit großer Wahrscheinlichkeit an einem Planeten vorbeikommen, und dann ändert sich sein freier Flug. Denn dann wird er durch dessen Anziehungskraft abgelenkt werden.

Wenn der Tischtennisball die Richtung, die bisher für ihn vorne war, als das allein glücksbringende Vorne definiert, dann passiert etwas Schreckliches: Er wird ein trauriger Ball werden. Nachdem er besagten Planeten gekreuzt hat und so von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt wurde, fliegt er wieder ungestört weiter – aber eben in eine andere Richtung. Wenn er nun sein altes Vorne als gut definiert, dann entfernt er sich immer weiter davon und wird immer unglücklicher. Eine gute Strategie für unseren Ball wäre deshalb, sein Wertesystem zu ändern und sich an die neue Flugrichtung anzupassen.

Mancher mag vielleicht sagen, dass es von mangelndem Rückgrat zeugt, sein Wertesystem zu ändern. Dabei wird das Ganze sogar noch komplexer, wenn unser Tischtennisball nicht der einzige im Universum ist. Was, wenn die nächste Ablenkung nicht von einem der weit entfernten Planeten herrührt, sondern wenn noch andere

Tischtennisbälle mit eigenen Wertesystemen im All herumschwirren und unser Ball gelegentlich gegen einen anderen prallt? Ein solcher Zusammenstoß würde die Flugrichtung beider dramatisch ändern, bis zur nächsten Kollision. Auch hier gilt wieder: Wenn unser Tischtennisball nur die eine Richtung, mit der er ins Leben gestoßen wurde, als gut betrachtet, dann ist es wahrscheinlich, dass ihn die Zusammenstöße mit anderen Tischtennisbällen unglücklich machen.

Wir müssen das absurde Beispiel noch ein kleines bisschen weiterspinnen. Tischtennisbälle im All fliegen in eine Richtung, bis sie auf etwas stoßen, und dann ändern sie nach dem Impulserhaltungssatz ihre Richtung, wie Kugeln auf dem Billardtisch. Aber ein Tischtennisball, den wir auf der Erde hochwerfen, wird nicht in gleicher Richtung fliegen, sondern seine Richtung stetig ändern. Entsprechend der Erdanziehungskraft wird er einen Parabelflug durchführen, bis er auf die Erde prallt. Erst geht es in die Richtung, in die wir ihn geworfen haben, aber sofort zieht ihn die Erde in ihren Bann und verändert seine Flugbahn. Mit einem festen Wertesystem wäre er zur Traurigkeit verdammt, und das zeigt vor allem, dass seine Bewegung auf der Erde eingeschränkt und unfrei ist. Das liegt daran, dass unsere Tischtennisbälle bisher zwar Gefühle haben, sich aber nicht von selbst fortbewegen können. So sind sie Sklaven ihrer Umgebung, ohne Einflussmöglichkeit auf ihr Schicksal.

Stellen wir uns nun die Welt als eine Welt von aktiven Bällen vor – von goldenen Schnatzen wie dem, den Harry Potter fangen muss, um für seine Mannschaft ein Quidditch-Spiel zu gewinnen. Der goldene Schnatz fliegt von allein vorwärts und scheint einen freien Willen zu haben.

Bei J. K. Rowling fliegt er zum Beispiel im Zickzack, um dem Fänger zu entkommen und damit seiner Bestimmung zu folgen. Nehmen wir jetzt mal an, dass unsere Tischtennisbälle sich frei bewegen und damit entscheiden können, wohin sie fliegen. Da ihr Wertesystem am Anfang festgelegt wurde, und zwar in die Richtung, in die sie ursprünglich geflogen sind, werden sie der Erde entfliehen und in diese Richtung wegfliegen. Und da sie sich selbst bewegen können, werden sie immer wieder auf diese Richtung zurückkehren. Wenn sie gegen einen Planeten prallen, dann versuchen sie, danach wieder zurück auf Kurs zu kommen, und streben weiter in die ursprüngliche Richtung. Das Gleiche werden sie tun, wenn sie mit einem anderen Ball zusammengestoßen sind. Von außen betrachtet scheint dieses Verhalten eher das eines Fanatikers zu sein, aber die Bälle werden immer glücklicher.

Es sei denn, es gibt ein Hindernis, das sie nicht umrunden können, zum Beispiel einen Krater in einem Planeten, aus dem sie nicht herauskommen, weil sie immer wieder kurzsichtig in die gleiche Richtung fliegen, ohne zu bedenken, dass sie damit nur wieder gegen das gleiche Hindernis prallen. Diese Art von Verhalten macht einen Schnatz zu einem dummen Schnatz. Tragisch wird es dann, wenn ihn seine kurzfristige Glücksoptimierung in die Richtung einer Sonne bringt. Denn dann wird er verbrennen.

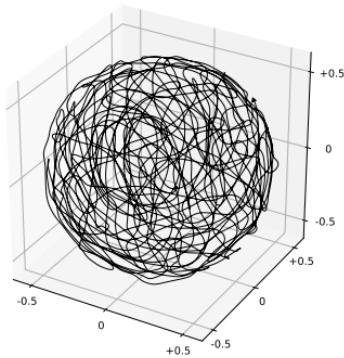
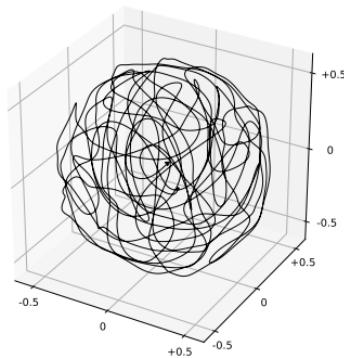
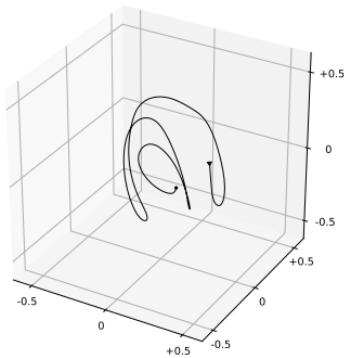
Was geschieht, wenn wir dem goldenen Schnatz nicht nur die Möglichkeit geben, sich frei zu bewegen, sondern auch die Möglichkeit, zu entscheiden, welche Richtung ihm gefällt? Wir können wohl annehmen, dass er dann nicht in eine Sonne fliegen würde. Aber würde er dann

überhaupt ins All fliegen und immer weiter geradeaus ans Ende des Universums? Vielleicht würde er das, aber das würde bedeuten, dass er all die anderen goldenen Schnatze hinter sich lassen würde. Manch ein Schnatz würde sicher diesen Weg wählen. Wenn aber Schnatze Luft zum Überleben bräuchten, dann würden sie die Atmosphäre sicher nicht verlassen. Sie würden die Grenze, die durch ihre Natur und die ihrer Umwelt gegeben ist, respektieren und in der Nähe der Erde bleiben.

Der Schnatz bei Harry Potter bleibt sogar in der Nähe des Spielfeldes, weil der Sinn seiner Existenz mit dem Spiel verbunden ist. Andere kleine goldene Bälle mögen einen anderen Sinn suchen und finden. Die Frage ist, betrachten wir sie als unfrei, weil sie die Atmosphäre nicht verlassen können? Ich glaube, sie sind genauso wenig unfrei wie ein Vogelschwarm, der sich frei am Himmel bewegen kann. Er darf nicht in den Ozean stürzen und nicht ins luftleere Weltall fliegen, aber zwischen diesen natürlichen Grenzen besteht unendliche Freiheit.

Tatsächlich könnte es sogar sein, dass Vogelschwärme sich gegenseitig aus dem Weg gehen und dadurch den Himmel und neue Futterquellen erkunden. Ich vermute, dass sich zwei Vogelschwärme, wenn man sie nah beieinander aussetzen würde, ihren jeweils eigenen Weg bahnen würden und erst mal so schnell wie möglich auseinanderfliegen, um sich nicht in die Quere zu kommen. Weil ihr Lebensraum begrenzt ist und es andere Vogelschwärme gibt, sind sie ständig dazu angehalten, neue Futterquellen und Brutplätze zu finden. Einige entwickeln vielleicht andere Methoden der Futterbeschaffung und des Nestbaus, um neue Lebensräume erkunden zu können. So entstehen aus dem Freiheitsdrang der

einzelnen Vogelschwärme und der Begrenztheit des Raumes Vielfalt und Kreativität. Das ist die Faltung (Abbildung 1).



*Abbildung 1 – Illustration der Faltung in einem dynamischen System. Gezeigt ist der Pfad eines Wesens, das versucht, Orte zu finden, an denen es noch nicht war. Es wird dabei von seiner eigenen Vergangenheit abgestoßen und strebt deshalb voran. Gleichzeitig muss es in einem endlichen Raum bleiben. Es ist sich dieser natürlichen Grenzen bewusst und faltet seinen Pfad, seine Trajektorie, immer, wenn es in die Nähe der Grenze kommt, zurück in die noch freien Gebiete. Nach und nach erforscht es den gesamten möglichen Raum. Es ist dabei schneller als jede systematische Suche.*

# 1 Das Wachstums-dilemma

You can drive out nature with a pitchfork,  
but it always comes roaring back again.

TOM WAITS, MISERY IS THE RIVER OF THE WORLD

Das Dilemma von Bewegung und Begrenztheit beschäftigt mich schon lange. Vor allem die Frage: Wie ist unendliches Wachstum auf einem begrenzten Planeten möglich? Als theoretischer Physiker forse ich seit zwanzig Jahren in der physikalischen Klimaforschung und seit nunmehr einem Jahrzehnt zusätzlich an den ökonomischen Aspekten des Problems.

Die weltweit führende wissenschaftliche Fachzeitschrift *Nature* hat in den letzten drei Jahren zweimal Publikationen meiner Arbeitsgruppe als Titelgeschichten veröffentlicht – einmal mit einer Studie über die physikalische Stabilität der Antarktis und einmal mit einer über die wirtschaftlichen Folgen von weltweiten Regenveränderungen. In diesem Buch verbinde ich Überlegungen aus den beiden Welten – den Natur- und den Wirtschaftswissenschaften. Die Begrenztheit unseres Planeten und seiner Ressourcen ist offensichtlich. Das Dilemma entsteht dann, wenn man, wie ich in Kapitel 4 darlege, davon überzeugt ist, dass eine fortwährende Weiterent-

wicklung unausweichlich ist. Diese Weiterentwicklung muss darüber hinaus frei von Beschränkungen erfolgen, um tatsächlich effektive Lösungen für neue Herausforderungen zu finden.

Ich möchte hier das Narrativ der Faltung anbieten, von dem ich glaube, dass es das Paradigma von unbegrenztem und stetigem Wachstum, das in weiten Teilen unseres Wirtschafts- und Gesellschaftssystems vorherrscht, ersetzen kann. Dabei handelt es sich um ein neues Narrativ, eine Alternative zu der Überzeugung, dass die Lösung unseres Nachhaltigkeitsproblems nur durch Verzicht und ein Zurück zu alten Lebensweisen möglich ist.

Auch wenn ich glaube, dass das Narrativ eine Orientierung für eine funktionierende Gesellschaft der Zukunft bietet, so kann dieses Buch nicht alle Lösungen liefern. Ich versuche, zu erklären, was der Gedanke der Faltung für einige wichtige Bereiche des Zusammenlebens bedeuten kann, und zeige, wie das Prinzip angewendet werden kann und wie flexibel es ist.

Ich glaube, dass die Anwendung der Faltung auf die politische und gesellschaftliche Gestaltung unserer Zukunft sehr weit tragen kann, und da wir vieles davon schon heute leben, wird es Ihnen zum Teil bekannt vorkommen. Verkürzt gesprochen entsteht Faltung immer dort, wo ein sich aktiv entwickelndes System mit Grenzen konfrontiert wird. Meine Vorschläge, die ich mit Blick auf die Faltung ableite, sind genau das, nämlich Vorschläge. Die Faltung existiert als Phänomen auch ohne diese möglichen Anwendungen.

Im Buch verwende ich keine mathematische Formel<sup>2</sup>,

---

2 Nur in Fußnoten – einige wenige.

doch aber Mathematik. Das muss niemanden abschrecken, denn Mathematik ist einfach nur die Sprache, die manche von uns gelernt haben, um Gedanken zu formulieren. Sie hat einige Vorteile und andere Nachteile. Man kann die Gedanken hier sicher auch auf andere Art ausdrücken, wie ich es bei meiner Frau und meinen Freunden schon erlebt habe. Ich hoffe, dass die Leserin und der Leser dies auch tun werden. Es sind zumeist einfache Gedanken, neu ist ihre Kombination.

Obwohl mathematische Beschreibungen der Wirklichkeit häufig mit physikalischen Gegebenheiten verbunden werden, ist die Mathematik doch noch wesentlich universeller in dem Sinne, dass sie auf alle Bereiche des Lebens angewendet werden kann. Sie ist eine Art »eingefrorene Logik«. Das bedeutet, wenn man einen Sachverhalt in die Mathematik überträgt oder in ihr darstellt, dann kann man deren Gesetze benutzen, um zu neuen Schlüssen zu gelangen. Da die Mathematik in sich widerspruchsfrei ist, sind die Schlüsse immer konsistent mit den Annahmen. Die einzige mögliche Fehlerquelle liegt in der Übertragung von Wirklichkeit in Mathematik und zurück. Mathematik repräsentiert Wahrheit. Das macht sie faszinierend und schränkt sie natürlich auf Sachverhalte ein, in denen es Wahrheit geben kann.

Sie werden keine Mathematik brauchen, um dieses Buch und das Konzept der Faltung zu verstehen – das verspreche ich Ihnen; vielmehr glaube ich, dass das mathematische Prinzip der Faltung produktiv sein kann, um die politische und gesellschaftliche Gestaltung der Zukunft neu zu denken, und ich lade Sie ein, mich bei diesem Versuch zu begleiten.

## 2 Das Prinzip der Selbstverstärkung

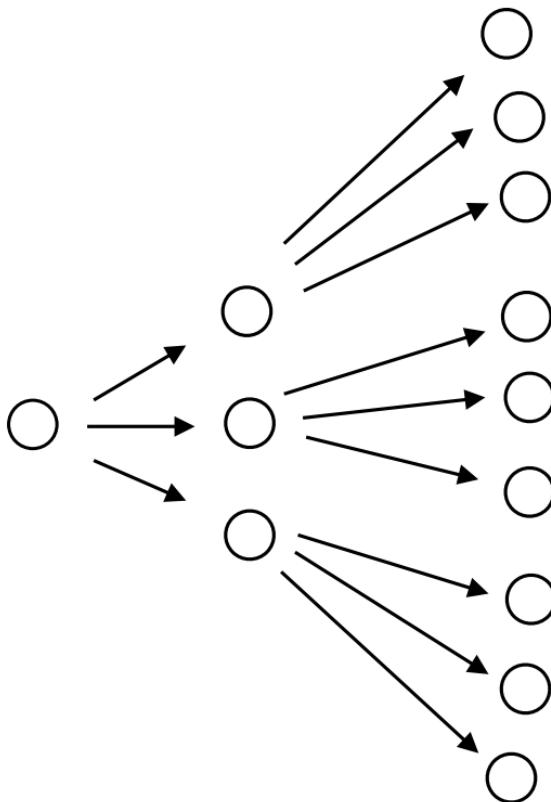
There's no prayer like desire.

TOM WAITS, BLACK MARKET BABY

Ehe ich das Konzept der Faltung näher erläutere und beispielhaft auf verschiedene Bereiche anwende, möchte ich ein Prinzip einführen, das in der Mathematik standardmäßig zur Beschreibung bestimmter Phänomene genutzt wird: die Selbstverstärkung.

Selbstverstärkungen sind leicht zu verstehen, und wir finden sie praktisch überall in unserem Leben (Abbildung 2). Mehr noch, sie stehen im Mittelpunkt eines Dilemmas, das wie kein zweites die politischen und gesellschaftlichen Debatten unserer Zeit bestimmt, ihnen in gewisser Weise sogar den Rahmen vorgibt: das Dilemma unseres unendlichen Wachstums auf einem endlichen Planeten.

Tatsächlich kann man die gesamte Welt aus der Sicht von Selbstverstärkungsprozessen betrachten, denn sie dominieren die Natur um uns herum ebenso wie unser Zusammenleben, und damit auch unser Wirtschaftswachstum und unseren Ressourcenverbrauch. Es lohnt sich also, den Mechanismus genauer zu ergründen, ehe wir darüber nachdenken, wie wir mit ihm umgehen können.



*Abbildung 2 – Einfache Illustration von Selbstverstärkung:* Bei der Atombombe wird durch ein Neutron ein Uranatom gespalten, und es entstehen drei weitere Neutronen. Dieses setzt eine Kettenreaktion oder Selbstverstärkung in Gang, und es entsteht exponentielles Wachstum der Neutronenanzahl. Ähnliche Mechanismen finden wir überall in der Natur, Wirtschaft und Gesellschaft – immer dann, wenn die Zunahme einer Größe mit der bereits vorhandenen Menge zunimmt: Mehr Hasen bedeuten mehr Hasenbabys.

## 2.1 Das Prinzip

Das Prinzip ist wunderbar einfach und universell<sup>3</sup>:

---

Eine Selbstverstärkung liegt vor, wenn eine Menge umso stärker anwächst, je größer sie bereits ist.

---

Einfacher ausgedrückt: je mehr Hasen, desto mehr Hasenbabys. Dabei kann die Menge, die da anwächst, materiell sein, wie eine Menge von niedlichen Nagern oder gefährlichen Viren. Es kann sich aber genauso um etwas Virtuelles handeln, wie das Geld auf meinem Konto oder den Wert der Firma Google. In den digitalen Medien erleben wir die Selbstverstärkung, wenn ein Gerücht rasend schnell die Runde macht oder durch viral werdende YouTube-Videos, Tweets und Lieder. Dass dieser Vorgang als »viral gehen« bezeichnet wird, spricht für sich. Je mehr Menschen etwas teilen, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass es weiter geteilt wird – sei es durch die Nutzer selbst auf Twitter, durch das Lästern an der Kaffeemaschine im Büro oder durch Algorithmen, wie bei den meisten anderen Onlineplattformen wie Instagram oder TikTok.

Die Menge, die wächst, kann sogar negativ sein. Bei einem Börsencrash wachsen die Verluste der Firmen

---

3 Einfachheit und Universalität sind neben der Widerspruchsfreiheit die höchsten Ziele wissenschaftlicher Theorie. Das ist in der berühmten epistemologischen Aussage aus der Scholastik zusammengefasst, die manchmal als Ockhams Rasiermesser bezeichnet wird. Wilhelm von Ockham beschrieb sie 1341 in seinen *Summa-logicae*-Manuskripten.

nach einem Selbstverstärkungsprinzip: Je stärker der Wert einer Aktie fällt, desto mehr Leute verkaufen sie, das Angebot auf dem Markt steigt, und der Preis fällt weiter.

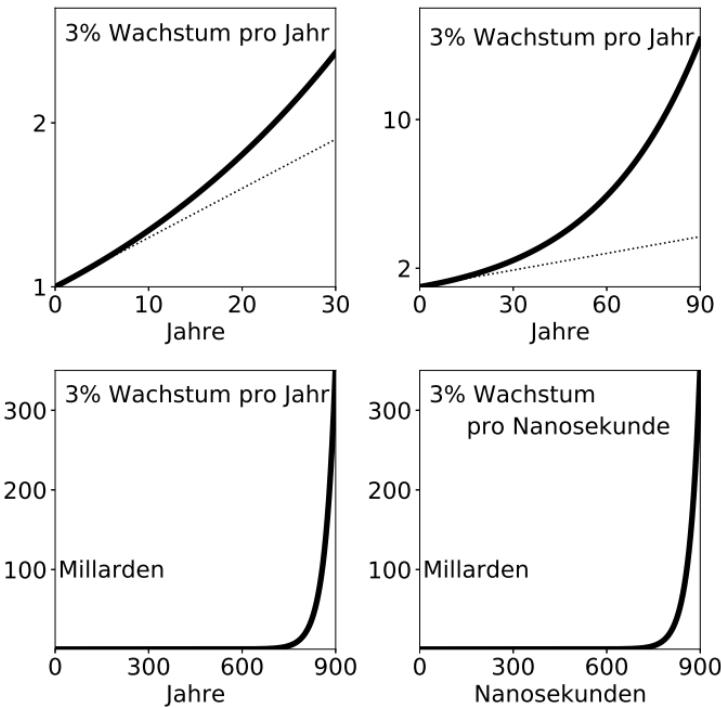
Aber langsam, lassen Sie uns einige Eigenschaften dieser Prozesse an ein paar einfachen Beispielen veranschaulichen, um ihre Bedeutung und Dynamik zu verstehen. Bei einer Viruserkrankung ist jedes Virus, das nicht vom Immunsystem unschädlich gemacht wird, eine Quelle für weitere Viren. Ohne Selbstverstärkung würden uns nur Viren krank machen, die wir von außen aufnehmen, ihre Anzahl in unserem Körper würde also nur steigen, wenn wir uns in der Nähe von infizierten Menschen befänden. Sobald wir uns von ihnen entfernen, würde die Zahl der Viren in unserem Körper stagnieren. Wir wären wesentlich seltener krank, und eine Coronapandemie hätte es nicht gegeben. Wir würden uns nicht »anstecken«. Stattdessen wäre eine Viruserkrankung, als würde man eine heiße Herdplatte anfassen: schädlich in dem Maße, wie wir uns verbrannt haben, aber nicht mehr. Tatsächlich entfalten die Viren nach der Infektion eine Eigendynamik in unserem Körper. Das hat eine Reihe von Konsequenzen. Zum Beispiel ist dann fast gleichgültig, ob wir noch weitere Viren von außen aufnehmen, denn ihre Menge in unserem Körper wird von der Dominanz der Eigenvermehrung gesteuert, nicht von der weiteren Aufnahme.

Das ist schon die erste universelle Eigenschaft von Selbstverstärkungsprozessen: Sie überschreiben innerhalb von kurzer Zeit jeden anderen Prozess, der keiner Selbstverstärkung folgt. Die Aufnahme der Viren, die von außen geschieht, ist solch ein Beispiel. Egal, wie viele wei-

tere Viren wir von außen aufnehmen: Sobald *in* unserem Körper der selbstverstärkende Prozess eingesetzt hat, wird diese Aufnahme durch eine viel rasanter steigende Zahl von Viren überschrieben. Der Verlauf der Krankheit wird vom Kampf unseres Immunsystems gegen die Eigendynamik der Viren bestimmt.

Selbstverstärkungen sind mathematisch sehr gut verstanden und haben eine ganze Reihe solcher Eigenschaften, die ihnen allen gemein sind. Ihre zeitliche Entwicklung zum Beispiel kann im Detail kompliziert sein, aber in der Essenz folgt sie immer einer sogenannten Exponentialfunktion (Abbildung 3), die zunächst langsam anwächst, dann aber ab einem gewissen Zeitpunkt explosionsartig zunimmt. Viele haben diese Funktionen bereits in der Schule kennengelernt, aber ganz schnell wieder vergessen, obwohl es wahrscheinlich die wichtigste mathematische Funktion ihres Lebens ist. Sie können mich jetzt natürlich nicht lächeln sehen, aber mir ist schon bewusst, dass 99 Prozent der Menschen sehr gut ohne mathematische Funktionen in ihrem Leben auskommen. Ob wir sie kennen oder nicht: Mathematik ist allgegenwärtig und transzendentiert alles. Wenn Außerirdische auf unserem Planeten landen würden, dann hätten sie die gleiche Mathematik wie wir, auch wenn ihre Gestalten aus Gas bestünden oder sie rein virtuelle Intelligenzen wären. Das ist die Schönheit dieser reinen Gedankenwelt.

Aber zurück zu den Selbstverstärkungen. Zunächst könnte man meinen, dass es die Einfachheit und Universalität des Prozesses ist, die Selbstverstärkungen so allgegenwärtig in unserem Leben machen. Der wirkliche Grund ist aber ihre dynamische Wucht. Sie führt dazu, dass ein Selbstverstärkungsprozess die Entwicklung eines



*Abbildung 3 – Selbstverstärktes und damit exponentielles Wachstum von drei Prozent nach unterschiedlicher Zeit. Kommen jedes Jahr drei Prozent des Ursprungswerts hinzu, dann ist der Wert nach dreißig Jahren mehr als verdoppelt (links oben), aber der Unterschied zu einem linearen Wachstum (gepunktete Linie), bei dem immer die gleiche Menge hinzukommt, ist noch gering. Nach drei Generationen oder neunzig Jahren ist dieser Unterschied nicht mehr aufzuholen (rechts oben). Findet das Drei-Prozent-Wachstum auf einer kürzeren Zeitskala statt, zum Beispiel innerhalb einer Nanosekunde, wie beim Ultrafast-Trading an der Börse (rechts unten), dann ist das vergleichbar mit dem jährlichen Wachstum nach 900 Jahren. Diese Steigerungsgeschwindigkeit ist ähnlich wie die Kettenreaktion in einer Atombombe.*

Systems dominiert, weil er immer stärker wird und damit andere Effekte verdrängt.

Das ist nicht selbstverständlich, denn nicht alles, was viel vorkommt in der Welt, ist durch einen solchen Prozess entstanden. Dass unser Körper zu einem Großteil aus Wasser besteht, hat seinen Grund zum Beispiel nicht in einem Selbstverstärkungsprozess. Ansonsten müssten wir Sorge haben, dass wir immer mehr Wasser in unserem Körper anreichern. Das ist normalerweise nicht der Fall. Stattdessen müssen wir sogar stetig Wasser trinken, um unseren Flüssigkeitshaushalt stabil zu halten.

Dieser einfache Unterschied bedeutet, dass wir mit Selbstverstärkungsprozessen grundsätzlich anders umgehen müssen als mit anderen Situationen, in denen einfach von irgendetwas viel da ist. Selbstverstärkungsprozesse sind kraftvoll und dominant. Und wenn sie das nicht sein sollen, dann müssen sie kontrolliert werden. Nicht nur in einer Pandemie.

Das exponentielle Wachstum dieser Selbstverstärkungsprozesse spiegelt sich in der mathematischen Theorie dynamischer Systeme durch einen positiven sogenannten Lyapunov-Exponenten wider. Das muss man nicht im Detail verstehen, aber der Kehrwert des Lyapunov-Exponenten ist ein Zeitmaß, das in etwa der Zeit entspricht, in der sich die wachsende Menge verdoppelt.<sup>4</sup>

---

4 Für die Profis: Tatsächlich ist es die Zeit, in der sich die Menge »ver-e-facht«, also um den Faktor der Eulerzahl ansteigt. Die Eulerzahl ist  $2.7182818\dots$  Die Verdopplungszeit ist also immer etwas kürzer als der Kehrwert des Lyapunov-Exponenten, um genau zu sein, um  $1-\ln(2)$  kleiner, d.h. um etwa 30 Prozent.

Wenn wir bei den Viruserkrankungen bleiben, dann zeigt sich, dass das Prinzip auch außerhalb des menschlichen Körpers weiterhin seine Gültigkeit behält. Eine Krankheit breitet sich exponentiell aus, wenn eine Person im Mittel mehr als eine weitere ansteckt, bevor sie sich in Quarantäne begibt. Selbst wenn es hier um die gleiche Krankheit ginge, so ist das doch ein völlig anderer Prozess als die Virenvermehrung innerhalb des Körpers. Die Anzahl der von einer Person angesteckten Personen, der sogenannte R-Faktor, hat während der Covid-19-Pandemie traurige Berühmtheit erlangt. Er ist hierbei das Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Nimmt man diesen R-Wert minus eins und multipliziert ihn mit dem Referenzzeitraum, zum Beispiel einem Tag oder der Zeitspanne, bis eine Person sich entweder in Quarantäne begibt oder nicht mehr ansteckend ist, dann hat man das Zeitmaß, in der sich die Zahl der Infizierten verdoppelt.<sup>5</sup> Das bedeutet: Ist der R-Wert größer als eins, dann steigt die Anzahl der Infizierten explosionsartig an, weil der Lyapunov-Exponent positiv ist.

Diese Art von Selbstverstärkungsprozessen kann man als explosionsartiges Wachstum bezeichnen, denn die Ausbreitung von Viren und Bakterien im Körper und die Verbreitung von Krankheiten von Mensch zu Mensch sind mathematisch praktisch identisch zu einer physikalischen Explosion: In einer Atombombe zum Beispiel führt die Spaltung jedes einzelnen Uranatomkerns zur Freisetzung von drei Neutronen, die dann weitere Uranatome spalten. Wenn jedes dieser Neutronen eine Spaltung verursacht, wäre der R-Faktor drei, und wenn dies

---

<sup>5</sup> Der Lyapunov-Exponent ist der R-Wert minus eins:  $\lambda = R - 1$ .