

SIBE-Edition

Klaus Mainzer



# Zukunft durch nachhaltige Innovation

Im Wettkampf der Systeme

 Springer Gabler

---

# **SIBE-Edition**

**Reihe herausgegeben von**

Werner G. Faix, Herrenberg, Deutschland

Die Reihe informiert zu aktuellen Themenfeldern aus dem Bereich Leadership von Expert\*innen des Steinbeis-Verbundes. Steinbeis ist weltweit im unternehmerischen Wissens- und Technologietransfer aktiv. Zum Steinbeis-Verbund gehören derzeit rund 1.000 Unternehmen. Das Dienstleistungsportfolio der fachlich spezialisierten Steinbeis-Unternehmen im Verbund umfasst Forschung und Entwicklung, Beratung und Expertisen sowie Aus- und Weiterbildung für alle Technologie- und Managementfelder. Ihren Sitz haben die Steinbeis-Unternehmen überwiegend an Forschungseinrichtungen, insbesondere Hochschulen, die originäre Wissensquellen für Steinbeis darstellen. Rund 6.000 Expert\*innen tragen zum praxisnahen Transfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft bei. Dach des Steinbeis-Verbundes ist die 1971 ins Leben gerufene Steinbeis-Stiftung, die ihren Sitz in Stuttgart hat. Die SCHOOL OF INTERNATIONAL BUSINESS AND ENTREPRENEURSHIP (SIBE) ist die Graduate School für Leadership & Management an der Steinbeis-Hochschule. Die SIBE-Edition verlegt ausgewählte Themen der Expert\*innen des Steinbeis-Verbundes.

---

Klaus Mainzer

# Zukunft durch nachhaltige Innovation

Im Wettkampf der Systeme

Prof. Dr. Klaus Mainzer  
TUM Senior Excellence Faculty  
Technische Universität München  
München, Deutschland

ISSN 2524-5880

ISSN 2524-5899 (electronic)

SIBE-Edition

ISBN 978-3-662-66325-7

ISBN 978-3-662-66326-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-66326-4>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Layout/Satz: Katsiaryna Kaliayeva

Illustrationen: Chaza Aladib

Planung/Lektorat: Christine Sheppard

Springer Gabler ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

# VORWORT

Dieses Buch erscheint in der Reihe Innovation/Leadership der SIBE-Edition im Springer-Verlag. Der Titel „Zukunft durch nachhaltige Innovation im Wettkampf der Systeme“ bringt das Anliegen dieses Buchs auf den Punkt. Auf dem Hintergrund der aktuellen politischen, wirtschaftlichen und militärischen Weltlage wird schlaglichtartig deutlich, woran es in der jüngsten Vergangenheit gravierend mangelte – an strategischem Denken. Die Zeit des Sichtflugs und kurzfristiger politischer und wirtschaftlicher Interessen führte in ein Desaster. Andere nutzten die Gunst der Stunde für ihre langfristigen Strategien und Interessen. Was können wir von Seiten der Wissenschaft, Forschung, Bildung und Ausbildung tun? Antwort: Strategische denken lernen, denn nur auf dieser Grundlage ist verantwortungsvolle Führung (Leadership) möglich!

Der Schlüssel zu einer gelungenen Strategie für Europa, so die These des Buchs, heißt Innovation. Menschen neigen dazu, lieber gewohnte und bisher erfolgreiche Entwicklungspfade nicht zu verlassen als auf neue Innovation zu setzen. Der Autor konnte als Leiter einer acatech (Deutsche Akademie für Technikwissenschaften) – Studie über „Verantwortung in Unternehmen und Institutionen für eine nachhaltige Technikentwicklung“ lernen, wie z. B. Teile der deutschen Automobilindustrie lieber der „Pfadabhängigkeit“ der Profite in der umweltbelastenden Dieselmotortechnik folgten, als rechtzeitig auf nachhaltige Elektromobilität umzusteigen.

Noch dramatischer zeigt sich die „Pfadabhängigkeit“ in der jüngsten Vergangenheit, als Verantwortliche in Politik und Wirtschaft Deutschland in die energiepolitische Abhängigkeit im Wesentlichen eines einzigen Landes brachten. Die bewährten Profite mit fossilen Brennstoffen wie Gas, Öl und Kohle waren verlockend, obwohl es an strategischen Warnungen vor einem blinden Vertrauen in den dominierenden Lieferanten nicht gefehlt hatte. Jeder Kleinaktionär weiß aber, dass man sich nie auf eine einzige Aktiensparte verlassen darf, möge sie kurzfristig noch so verlockend sein. Ein gutes Portfolio zeichnet sich durch Diversität und Vielfalt aus, um langfristig trotz aller Krisen einen guten Schnitt zu machen.

Die These ist daher, dass der Druck der gegenwärtigen politischen, wirtschaftlichen und militärischen Krise genutzt werden sollte, um beschleunigt in nachhaltige Innovationen umzusteigen, um aus der Pfadabhängigkeit fossiler Energien auszusteigen. So soll das eigentliche große Menschheitsproblem gelöst werden – die globale Umwelt- und Klimakrise. Wie in der Politik darf dabei allerdings nicht auf eine einzige Lösung gesetzt werden, sondern es muss das gesamte technologische Potenzial in einem Innovationsportfolio gebündelt werden.

Auch Zukunftstechnologien sind wie Aktien Wetten auf die Zukunft. Dazu müssen für Europa Vor- und Nachteile von z. B. Solar- und Windenergie, Wasserkraft, Wasserstoff, Kern- und Fusionsenergie gegeneinander abgewogen und in einem „hybriden“ Energiesystem miteinander verbunden werden, um das europäische Innovationsportfolio auf eine nachhaltige Zukunft auszurichten. Auch bei einem Innovationsportfolio sorgt Diversität für resilientes Verhalten, um auf die Risiken der Zukunft flexibel reagieren und sich bei punktuellen Rückschlägen insgesamt erholen zu können.

Versorgungs- und Lieferketten der Energie sind nur ein Beispiel für komplexe Netzwerke moderner Zivilisation, deren gewaltige Daten- und Informationsmengen ohne Digitalisierung und Künstliche Intelligenz (KI) nicht zu bewältigen sind. Allerdings benötigt die Digitalisierung ein gewaltiges Energieaufkommen, das bei verschiedenen Rechnertechnologien unterschiedlich ausfällt. Wie in der Energiefrage darf bei der Digitalisierung nicht auf eine einzige Lösung gesetzt werden, sondern es muss das gesamte technologische Potenzial in einem Innovationsportfolio gebündelt werden. In diesem Buch werden klassische Digitalisierung und Künstliche Intelligenz zusammen mit Zukunftstechnologien wie neuromorphem Rechnen (nach dem energiesparenden Modus natürlicher Gehirne) ebenso untersucht wie Quantenrechner, Quantenkommunikation und Quantentechnologie. Dazu müssen für Europa Vor- und Nachteile der digitalen und analogen Technologien gegeneinander abgewogen und in einer „hybriden“ IT und KI verbunden werden, damit auch dieses europäische Innovationsportfolio zusammen mit der Energiefrage auf eine nachhaltige Zukunft ausgerichtet wird.

Ein Innovationsportfolio setzt sich aus Basis-, Brücken- und Zukunftstechnologien zusammen, die sich kurz- und mittelfristig än-

dern, aufgegeben und durch neue ersetzt werden müssen. Ein Innovationsportfolio ist daher dynamisch und muss ständig gestaltet werden. Methodisch wird dazu auf die mathematische Theorie komplexer Systeme und nichtlinearer Dynamik zurückgegriffen, mit der sich komplexe Systeme und Netzwerke in Natur, Wirtschaft und Gesellschaft modellieren lassen und der Autor seit Jahrzehnten auseinandersetzt. Chaos und Risiken werden auf dieser Grundlage in Frühwarnsystemen abschätzbar und in strategisches Handeln umsetzbar.

Die jüngste politische, wirtschaftliche und militärische Krise zeigt auch, dass sich strategisches Denken und Handeln nicht getrennt auf einzelne Sparten der Forschung, Technologie und Wirtschaft beschränken lassen. Innovationsstrategien stehen in einer globalen Auseinandersetzung der politischen Weltsysteme. Innovationssysteme, so eine weitere These dieses Buchs, sind Ausdruck von unterschiedlichen Wertsystemen z. B. in den USA, Russland, China und Europa. Der freiheitlich demokratische Rechtsstaat ist dabei nicht nur Ausdruck der in der UN-Charta herausgestellten Menschenrechte, sondern verschafft auch Rechtssicherheit für Innovationen und Märkte, auf denen der wirtschaftliche Wettbewerb ausgetragen wird.

Imperiales Denken und das Pochen auf imperiale Einflussphären und das Recht des Stärkeren wirft die Menschheit nur um Jahrhunderte zurück und führt sie in den Abgrund. Daher ist dieses Buch auch ein Plädoyer für ein internationales Völkerrecht, nachdem die Bürgerinnen und Bürger eines souveränen Landes über ihre Zukunft allein bestimmen und sonst niemand. Zu einem globalen Völkerrecht, so die Zukunftsperspektive, gehört wie in einem demokratischen Staat zwingend eine internationale Gerichtsbarkeit, mit der alle Verantwortlichen rechnen müssen.

Am Ende geht es in diesem Buch um globale Innovation und Leadership, um diesen Planeten auf seine wahren globalen Herausforderungen vorzubereiten. Solange wir uns allerdings in Gezänk und Kriegen untereinander immer wieder zurückwerfen, besteht die reale Gefahr, dass die roten Linien, die uns die Natur setzt, verdrängt und überschritten werden. Dann ist es aber irreversibel zu spät, wie uns die mathematischen Modelle komplexer Systemdynamik beweisen.

Anregungen zu diesem Buch gehen auf meine Tätigkeit im Beirat des BMBF-Zukunftsclusters „NeuroSys – Neuromorphe Hardware für autonome Systeme der künstlichen Intelligenz“ zurück. Als Präsident der Europäischen Akademie der Wissenschaften und Künste (EASA) danke ich den Autoren der EASA-Expertengruppen „Digitalization, AI, and Societal Impact“ und „Environment, Climate, and Energy“, auf deren Expertenpapiere in den Kapiteln vier und fünf zurückgegriffen werden konnte. Der School of International Business and Entrepreneurship (SIBE) und Werner G. Faix als Herausgeber dieser Buchreihe danke ich für ihre Unterstützung.

München

Klaus Mainzer

im Dezember 2022

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Hauptwörtern in diesem Buch i.d.R. die männliche Form verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.

# INHALTSVERZEICHNIS

Bedeutung der Symbole.....	X
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Dynamik komplexer Systeme.....</b>	<b>15</b>
<b>3 Innovation, Evolution, Disruption .....</b>	<b>33</b>
<b>4 Energietechnologie und Nachhaltigkeit .....</b>	<b>67</b>
4.1 Solar- und Windenergie .....	70
4.2 Wasserkraft .....	82
4.3 Wasserstoff .....	88
4.4 Kernenergie.....	103
4.5 Fusionsenergie .....	122
4.6 Hybride Energiesysteme als nachhaltiges Innovationsportfolio.....	127
<b>5 Informationstechnologie und Nachhaltigkeit .....</b>	<b>141</b>
5.1 Digitale KI-Systeme.....	143
5.2 Digitale Quantensysteme.....	169
5.3 Neuromorphe IT-Systeme.....	185
5.4 Hybride IT-Systeme als nachhaltiges Innovationsportfolio.....	206
<b>6 Wettkampf der Wertesysteme .....</b>	<b>221</b>
6.1 Innovationsdynamik im Systemvergleich .....	222
6.2 Innovation, Business und Freiheit (USA) .....	226
6.3 Fossile Energien, Imperium und Autokratie (Russland) ...	235
6.4 Innovation, Imperium und Autokratie (China).....	242
6.5 Innovation, Nachhaltigkeit und Menschenrechte (Europa).....	250
<b>7 Zukunft zwischen Nachhaltigkeit und planetarischem     Aufbruch .....</b>	<b>269</b>
<b>8 Autorenbiografie .....</b>	<b>289</b>

## BEDEUTUNG DER SYMBOLE



Exkurs

In Bezug zum jeweiligen Kapitelthema behandelt der Exkurs eine kurze Ausarbeitung zu thematischen Schnittstellen. Durch diesen Einschub wird ein umfassendes theoretisches Verständnis ermöglicht.



Merke

Zentrale Aussagen und bedeutende Erkenntnisse aus der Wissenschaft und Praxis sind mit einem Merke-Symbol versehen.



Definition

Relevante Grundbegriffe sind durch Definitionen erklärt.



Call to action

Wirkungsvolle Call-to-Actions fordern dazu auf, sich eigene Gedanken zu einer bestimmten Fragestellung zu machen. Hier bietet sich eine Denkpause an, um die Inhalte zu reflektieren.

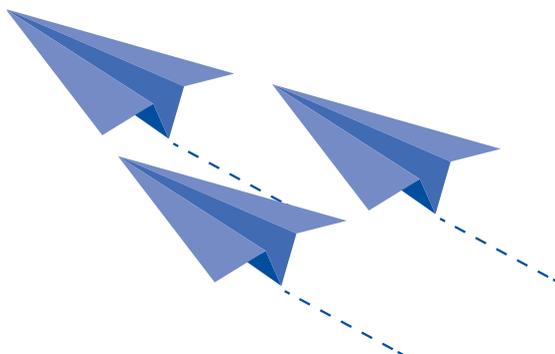
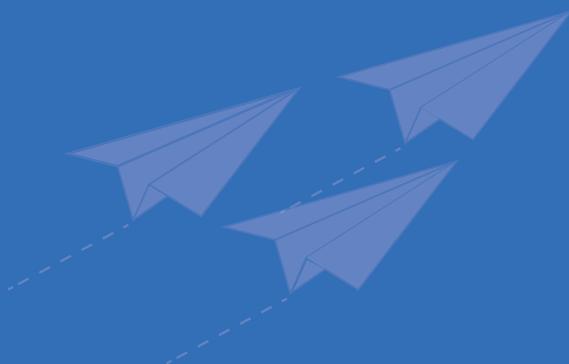


Zusatzmaterial

Durch wertvolle Zusatzmaterialien werden die Theorie-Grundlagen für die personale und Performanz-Entwicklung vertieft. Eingebundene QR-Codes verlinken auf umfangreiche und aktuelle wissenschaftliche Journal-Literatur zum jeweiligen Themengebiet.



# 1 EINFÜHRUNG



Als am 24. Februar 2022 russische Truppen die Grenzen der Ukraine überschritten, fand ein Phasenübergang der Weltgeschichte statt: Danach war die Welt eine andere als vorher. Mancher mag sich an den Ausspruch Goethes anlässlich der Kanonade von Valmy 1792 im Krieg der antifranzösischen Monarchien gegen das Revolutionsheer der jungen Französischen Republik erinnern haben: „Von hier und heute geht eine neue Epoche der Weltgeschichte aus, und ihr könnt sagen, ihr seid dabei gewesen.“ [1] Damals versuchten autokratisch-restaurative Mächte die republikanisch-freiheitlichen Entwicklungen eines Landes durch Invasion zu stoppen. Aber hier endet auch schon die Analogie. Gegenüber dem Leid und Elend von Millionen von Menschen, das im Februar 2022 ausgelöst wurde, müssen die Ereignisse im September 1792 geradezu operettenhaft wirken. Dabei gewesen ist man allerdings. Aber nicht auf dem Feldherrnhügel wie seinerzeit der Minister Goethe im Gefolge seines Herzogs, sondern als Teil eines weltweiten Millionenpublikums mit allen Medien des 21. Jahrhunderts.

Phasenübergang meint nicht nur eine politische Metapher:



Merke

In mathematischen Modellen komplexer dynamischer Systeme findet ein Phasenübergang an einem kritischen Punkt statt, wenn der Systemzustand augenblicklich in einen anderen umschlägt [2] (siehe auch Kapitel 2). Beispiele aus der Physik sind komplexe molekulare Systeme wie Flüssigkeiten, die an kritischen Temperaturwerten bei Abkühlung augenblicklich in Festkörper wie Eiskristalle übergehen oder bei Erhitzung in Dampf, Gas und schließlich Plasma. Mathematische Klimamodelle mit Millionen von Parametern schlagen an kritischen Kontrollwerten unumkehrbar (irreversibel) in chaotische Zustände um.

Komplexe ökologische Modelle sagen voraus, wie an kritischen Kontrollwerten Artenvielfalt verschwindet. Weltweite Finanzsysteme reagieren nach der Mathematik komplexer Systeme auf kleinste Fluktuationen. In urbanen Systemen kann der Umschlag von Ordnung in Chaos durch lokale Störungen der Infrastruktur ausgelöst werden.

Aber auch Kriege und Schlachten lassen sich als komplexe dynamische Systeme modellieren. Kein geringerer als Carl von Clausewitz hat in seinem Klassiker „Vom Kriege“ (1832) dafür die Grundlagen

gelegt [3]. So zeigt von Clausewitz auf, wie die Dynamik eines Krieges durch Kulminationspunkte bestimmt ist, in der sich Kräfte und Energie des Angreifers verbrauchen und erlahmen und wie die Dynamik umschlagen kann, indem der Verteidiger zum Angriff übergeht. Die Kulminationspunkte erinnern an Attraktoren in komplexen dynamischen Systemen, auf die Strömungen und Trajektorien zulaufen. In Kapitel sieben seines ersten Buchs behandelt von Clausewitz die „Friktion des Kriegs“ und nimmt damit bemerkenswerte Einsichten in der Theorie dynamischer Systeme und Chaostheorie vorweg:

„Friktion“ entspricht in der Physik der „Reibung“, „Dissipation“ und der Zunahme von „Entropie“ in der Wirklichkeit, mit der z. B. die Schwingungen eines Pendels schließlich zum Stillstand kommen. Von Clausewitz verweist auf die Wirklichkeit des Kriegs, in der die Friktion eine grundlegende Störgröße für die idealen Strategieplanungen eines Generalstabs ist. Die Forderung nach dem Primat der Politik und die Idee des Volkskriegs katapultierten das Buch „Vom Kriege“ zu einem der einflussreichsten Werke des 19. und 20. Jahrhunderts, das nicht nur bis heute an Militärakademien gelehrt wird, sondern auch für Management und Unternehmensführung von grundlegender Bedeutung ist.

Gibt es Frühwarnsysteme, um den plötzlichen Umschlag der Systemzustände vorauszusagen? Die Trends komplexer Systeme lassen sich zwar nicht wie eine Sonnenfinsternis aus Planetenstellungen eindeutig berechnen, aber kritische Kontrollwerte signalisieren mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit einen Phasenübergang. Die Berechenbarkeitsgrenzen hängen vom Komplexitätsgrad der Systemmodelle ab. Mit Komplexität ist nicht nur die Anzahl der Systemelemente gemeint, sondern die Art und Vielfalt ihrer Wechselwirkung, die im Modell zu schwierig lösbaren nichtlinearen Gleichungen führen. Ökologische und ökonomische Modelle sind in diesem Sinn hochkomplex gegenüber niedrigdimensionalen Systemen der Physik, von politischen Modellen ganz abgesehen.

Zurück zum Phasenübergang am 24. Februar 2022: Hätte er vorausgesagt werden können? Kritische Phasenübergänge beleuchten komplexe Zusammenhänge und Abhängigkeiten, die vorher verborgen waren, schlaglichtartig wie unter einem Brennglas. Im Nachhinein fällt es uns wie Schuppen von den Augen. Natürlich, wird man sagen: Im Nachhinein scheinen alle politischen, ökonomischen und

militärischen Entwicklungstrajektorien auf diesen Zeitpunkt hinzulaufen. Entsprechende Beobachtungsdaten und Analysen z. B. von Geheimdiensten und Thinktanks lagen vor. Aber sie widersprachen vielerorts eigenen Wirtschaftsinteressen, politischer Bequemlichkeit und Wunschenken und führten deshalb zu falschen Bewertungen. Eine fatale und gefährlich Mischung für die Analyse und Bewertung komplexer Systemdynamik!

Schlagartig wurde nach dem 24. Februar 2022 die fatale Abhängigkeit westlicher Staaten von russischen Energie- und Versorgungssystemen klar. Der Wohlstand eines Landes (wie z. B. Deutschland) und das Funktionieren von ganzen Wirtschaftszweigen hing von den vergleichsweise billigen fossilen Brennstoffen und Rohmaterialien des Aggressors in der Ukraine ab. Zudem ließen offizielle Äußerungen darauf schließen, dass die Aggression keineswegs auf die Ukraine beschränkt bleiben sollte, sondern auf Wiederherstellung eines verloren geglaubten russischen Großimperiums abzielt. Revisionismus und Imperialismus, die Gespenster des 20. Jahrhunderts, schienen in Europa wiederauferstanden. Obwohl die komplexen Netzwerke der z. B. Gas- und Ölleitungen in die EU-Länder auch vorher bekannt waren, setzte daher mit dem russischen Angriff vom 24. Februar 2022 eine politische Neubewertung ein.

Auch dabei zeigen sich wieder bemerkenswerte Einsichten aus der Theorie komplexer dynamischer Systeme. Der amerikanische Ökonom Brian Arthur hatte in den 1980er Jahren im Anschluss an Ideen von Joseph Schumpeter von der Pfadabhängigkeit ökonomischer Entwicklungen gesprochen [4].



Merke

In komplexen dynamischen Systemen werden Entwicklungstrends als „Pfade“ bezeichnet, in denen sich einzelne Entwicklungstrajektorien bündeln. In Unternehmen und Märkten können positive Rückkopplungseffekte den eingeschlagenen Pfad verstärken. Dabei werden kleinere Einflüsse zurückgedrängt, und eine Richtungskorrektur der Entwicklungspfade wird zunehmend aufwendiger. Am Ende wird an einem Pfad auch dann festgehalten, wenn eine Alternative besser gewesen wäre. Lehrprozesse werden zunehmend unwahrscheinlicher und können einen zunächst erfolgreichen Entwicklungspfad in den Ruin führen.

Ein anschauliches Beispiel war jüngst die deutsche Automobilindustrie, die den Absprung in die Elektromobilität zu verpassen drohte. Grund war der über Jahrzehnte äußerst erfolgreiche Entwicklungspfad der Firmen mit Verbrennungsmotoren wie z. B. Diesel, auf dem man am Ende selbst um den Preis von Betrugssoftware bleiben wollte. So erwies sich auch die Versorgung mit vergleichsweise billigem russischem Gas als bequem und wirtschaftlich vorteilhaft gegenüber anderen europäischen Ländern. Abgesehen von der politischen Abhängigkeit durch Nord Stream 2, das bis in die letzten Tage vor der Invasion als „rein privatwirtschaftlich“ dargestellt wurde, wirkte die zunehmende Pfadabhängigkeit der billigen russischen Gas- und Ölversorgung auch lähmend auf die Abkehr von fossilen Verbrennungsenergien und die Umstellung auf moderne erneuerbare Energien. Die Trendverstärkung der Pfadabhängigkeit war keineswegs nur vom Interesse an schnellen und sicheren Unternehmensgewinnen bestimmt. Auch gesellschaftspolitische und gewerkschaftliche Interessen wurden ins Feld geführt, um Millionen von Arbeitsplätzen mit den alten fossilen Energieträgern zu sichern.

Wieder blieben die Verantwortlichen in Politik und Wirtschaft lieber in den bequemen und Profit versprechenden Gleisen und lieferten Deutschland einem hoch problematischen Lieferanten fossiler Brennstoffe aus, als rechtzeitig auf neue Innovationen umzusteigen. Dabei weiß jeder Kleinaktionär, dass es bei einem guten Portfolio auf Diversifizierung ankommt, um bei Ausfall einzelner Aktien dennoch am Ende einen guten Schnitt zu machen. Auch Zukunftstechnologien sind Wetten auf die Zukunft. Klug wäre es in Deutschland gewesen, wie z. B. in den Niederlanden rechtzeitig auf Flüssiggas (LNG Liquefied Natural Gas) zu setzen, rechtzeitig Häfen und Infrastruktur zu bauen, um dieses Gas mit Schiffen aus verschiedenen Ländern zu beziehen. Wenn ein Lieferant ausfällt oder politisch brisant wird, bleibt bei einem gutem Energieportfolio die Versorgungssicherheit gewährleistet.

Die Gefahr, dass sich Marktkräfte in eingefahrenen Gleisen verkrusten, hatte bereits Joseph Schumpeter gesehen und von der „schöpferischen Zerstörung“ des Kapitalismus gesprochen [5]. Nach Schumpeter brechen Innovationen diese Verkrustungen auf und sind die treibenden Kräfte der Marktwirtschaft, die den Wohlstand sichern (siehe auch Kapitel 3). Mit Blick auf Klima- und Umweltkrise sind

nachhaltige Innovationen erneuerbarer Energien das Gebot der Stunde. Die Warnsignale kritischer Kontrollparameter sind in allen Klimamodellen unübersehbar und dulden keine Verschleppung in der Pfadabhängigkeit der Bequemlichkeit.

Insofern birgt die politisch-militärische Krise des Ukraine-Kriegs auch eine Chance. Der politisch-militärisch erzwungene Ausstieg aus der Abhängigkeit von fossilen Energien sollte zur Beschleunigung nachhaltiger Innovationsdynamik genutzt werden. Jedenfalls ist das eine zentrale These und Forderung dieses Buchs.



Merke

Wir sprechen in diesem Buch auch von einem Innovationsportfolio, mit dem sich die Zukunft bewältigen lässt. Ein Innovationsportfolio setzt sich aus den derzeitigen Ausgangs-, Brücken- und Zukunftstechnologien zusammen, die – miteinander vernetzt und voneinander abhängig – sich in ständigen Phasenübergängen befinden. Ein Innovationsportfolio ist deshalb dynamisch.

„Wo aber Gefahr ist, wächst das Rettende auch,“ heißt es bei Hölderlin in seinem Gedicht „Patmos“ [6]. In der griechischen Mythologie ist es nicht die Glücks- und Zufallsgöttin Tyche (römisch: Fortuna), die den Fortschritt bringt, sondern Kairos, der Gott des günstigen Augenblicks, der Chancen buchstäblich beim Schopf packt und nutzt. In der komplexen Systemdynamik von Wirtschaft und Gesellschaft sind es Innovationen und Wettbewerb, die neue Märkte, Entwicklungen und Veränderungen anstoßen. Bei Schumpeter sind es Unternehmer, die Chancen mit neuen Innovationen nutzen, Kapital aufnehmen und ins Risiko gehen. In biologischen Evolutionsmodellen wird die mathematische Systemdynamik durch Mutationen und Selektionen anstelle von Innovationen und Märkten erklärt. Angesichts der globalen Umwelt- und Klimakrise müssen sich alle Innovationen an den Maßstäben der Nachhaltigkeit messen, wie sie z. B. in den Sustainable Development Goals (SDGs) der UN festgehalten sind [7].

Ein Schlüssel für nachhaltige Innovationen sind Informations- und Energietechnologien, die unmittelbar zusammenhängen. Einerseits bedarf es neuer Technologien für erneuerbare Energien, um von Umwelt- und Klimabelastungen durch fossile Energieträger loszukommen. Beispiele, die in diesem Buch besprochen werden, sind Solar-

und Windenergie, Wasser und Wasserstoff, Fusion und Kernenergie, die in hybriden europäischen Versorgungsnetzen zusammenzuführen sind. In dem Zusammenhang sprechen wir auch von einem dynamischen Innovationsportfolio, in dem die vielfältigen Energiesysteme als Ausgangs- und Brückentechnologien „hybrid“ zu verbinden sind. Die Vielfalt des Portfolios schützt wie bei Aktien vor Abstürzen bei einseitigen Abhängigkeiten. Zukunftstechnologien der Energie sind in dem Sinn auch Wetten auf die Zukunft. Dynamische Innovationsportfolios der Energietechnologien sollten aber nicht einseitig auf die Optimierung von Gewinnen orientiert sein, sondern auf Nachhaltigkeit (siehe auch Kapitel 4).

Eine effiziente Steuerung dieser Prozesse ist ohne Künstliche Intelligenz (KI), Informations- und Kommunikationstechnologie nicht möglich. Zudem erfordert das gigantische Wachstum von Daten und Informationen in komplexen Zivilisationen eine gesteigerte Rechnerleistung von Computern. Diese Rechnerleistungen müssen wiederum energieeffizient sein, um Nachhaltigkeit zu fördern. Daher sind wie bei den verschiedenen Energietechnologien auch verschiedene IT- und Rechnertechnologien zu berücksichtigen – von klassischen Rechnern mit Künstlicher Intelligenz und Machine Learning bis zu Quantencomputing und neuromorphen Rechnern nach dem Vorbild des menschlichen Gehirns. In dem Zusammenhang sprechen wir wieder von einem dynamischen Innovationsportfolio, in dem die vielfältigen IT-Systeme als Ausgangs- und Brückentechnologien „hybrid“ zu verbinden sind. Die Vielfalt des Portfolios schützt wieder wie bei Aktien vor Abstürzen bei einseitigen Abhängigkeiten. Zukunftstechnologien der IT sind in dem Sinn auch Wetten auf die Zukunft. Dynamische Innovationsportfolios der IT-Technologien sollten aber wieder nicht einseitig auf die Optimierung von Gewinnen orientiert sein, sondern auf Nachhaltigkeit (siehe auch Kapitel 5).

Digitale KI-Systeme sind selbst Beispiele komplexer dynamischer Systeme, die im Machine Learning durch neuronale Netze realisiert werden. Sie erinnern zwar in ihrer Architektur an die Vernetzung von Neuronen und Synapsen in natürlichen Gehirnen. Tatsächlich werden sie aber auf digitalen Computern nach dem traditionellen Schema einer von-Neumann-Architektur nur simuliert. Dabei sind Rechenschritte nacheinander (sequenziell) abzuarbeiten und z. B. Steuerungs- und Speichereinheit zur Datenverarbeitung getrennt.

Damit wird erforderlich, für alle Rechenschritte Daten zwischen Prozessor und Speicher permanent hin und her zu „schaufeln“, was sowohl einen großen Energiebedarf als auch Umweltbelastung durch zusätzlich Wärmeabgabe bedeutet.

Demgegenüber sind diese Trennungen in den neuronalen Netzen natürlicher Gehirne aufgehoben. Natürliche Gehirne verarbeiten Informationen parallel, wobei Speicherung und Informationsverarbeitung in Nervenzellen (Neuronen) integriert sind. Dadurch kommt es zu einer beispiellosen Energieeffizienz bei gleichzeitig bisher nicht eingeholten Intelligenzleistungen natürlicher Gehirne. Daher ist das neuromorphe Rechnen mit gehirnnähnlichen Architekturen hochattraktiv, allerdings auf technischer Hardware von Silizium und anderen nanoskalierten Netzwerken und (noch nicht) biologischen Geweben. Auch hier liegt mathematisch komplexe Systemdynamik zugrunde.

Schließlich wird in diesem Buch das Quantencomputing als weitere Zukunftstechnologie der Informations- und Kommunikationstechnologie berücksichtigt. Wie im Beispiel der verschiedenen Energietechnologien läuft es am Ende auf eine hybride Informations- und Kommunikationstechnologie hinaus, in der die verschiedenen Rechnerparadigmen integriert sind, um ihre unterschiedlichen Vor- und Nachteile für eine nachhaltige Gesamtlösung zu nutzen.

Kommen wir zurück zum 24. Februar 2022, der – so die Hoffnung – zu einem beschleunigten Innovationsschub nachhaltiger Technologien führen sollte. Wäre dann wieder der Krieg der Vater aller Dinge, wie Heraklit behauptet haben soll? Analysiert man Innovationsdynamik, dann ist es nicht eine kriegerische Handlung, die das Neue in die Welt bringt, sondern der Wettstreit und die Auseinandersetzung verschiedener Alternativen. Tatsächlich stehen Innovationen heute im globalen Wettkampf verschiedener Wertesysteme (siehe auch Kapitel 6). Hegel und Marx beschrieben diese Dynamik jeder auf seine Weise als „Dialektik“. Mathematisch können wir heute diese Dynamik wesentlich differenzierter mit Phasenübergängen komplexer dynamischer Systeme modellieren, empirisch prüfen, begrenzt prognostizieren und als Frühwarnsysteme nutzen.

Wertesysteme werden aber nicht nur ökonomisch bemessen. Hinter den Panzern, Raketen und Atombomben der Supermächte, hinter

den BIP-Zahlen und anderen wirtschaftlichen Bemessungsgrößen ihrer Volkswirtschaften stehen vor allem unterschiedliche ethische und rechtliche Wertesysteme der Weltmächte, die ihr Handeln bestimmen und ihre Innovationsdynamik beeinflussen. So werden in einem folgenden Kapitel die USA unter den Leitideen Innovation, Business und Freiheit behandelt. Bei Russland fällt die Abhängigkeit vom Geschäft mit Rohstoffen und fossilen Energien auf, um mit dem Gewinn aufzurüsten und den Traum vom russischen Imperium auch militärisch zu realisieren. Wie in China wird dazu politisch ein autokratisches Lenkungsmodell benutzt. Die Leitideen lauten daher hier fossile Energien, Imperium und Autokratie.

Im Unterschied zu Russland ist China aber nicht nur eine militärische, sondern auch eine wirtschaftliche Großmacht mit großer Innovationspower, die zwar imperiale Interessen verfolgt, allerdings bisher mit weitgehend friedlichen Methoden. Gleichwohl werden weltweite Netzwerke geschaffen, die der globalen wirtschaftlichen Förderung von Abhängigkeiten wie z. B. durch die Seidenstraße dienen. Wenn Europa dagegen bestehen will, muss es mit vergleichsweise wenigen Rohstoffen und fossilen Brennstoffen auf die Innovationskraft seiner Menschen setzen, um Europa technologisch und wirtschaftlich unabhängig zu machen. Auf dieser Grundlage sind soziale, nachhaltige und sichere Lebensbedingungen zu schaffen, die mit einer freiheitlich-demokratischen Grundordnung ein lebenswertes Gesellschaftsmodell anbieten. Die Leitideen lauten daher hier Innovation, Nachhaltigkeit und Menschenrechte. In der Sprache komplexer Systemdynamik muss Europa zu einem stabilen Attraktor werden.

Gibt es allgemein bindende Regeln, nach denen der Wettstreit der Wertesysteme ausgetragen werden sollte? Spätestens seit den Weltkriegen des 20. Jahrhunderts verbunden mit der Entwicklung der modernen Waffentechnik bis zur apokalyptischen Selbstvernichtung durch Atomwaffen können Kriege nicht mehr als „Fortsetzung der Politik mit anderen Mitteln“ (von Clausewitz) betrachtet werden. In einer dicht besiedelten und hochentwickelten Zivilgesellschaft sind die Auswirkungen selbst einer „militärischen Spezialoperation“ [8] wie in der Ukraine so monströs und letztlich unkontrollierbar, dass sich der Einsatz militärischer Mittel von vornherein verbieten sollte. Die „Friktionen“ mit humanen und materialen „Kosten“ sind heute so groß, dass es am Ende nur Verlierer geben kann. Hinter aller

menschlicher Betroffenheit über millionenfaches individuelles Leid und Elend steht letztlich die Komplexität moderner Gesellschaften, die den „Preis“ von Kriegen so hochtreibt.

Nach dem Zerfall der mittelalterlich-theologischen Weltordnung und auf dem Hintergrund der furchtbaren europäischen Religionskriege entwickelte sich die Leitidee, vernunftorientierte Regeln und Gesetze für jegliche Art der zivilen und politischen Auseinandersetzung zu formulieren und durchzusetzen. Der bisherige Höhepunkt der Entwicklung ist der moderne Rechtsstaat auf der Grundlage einer freiheitlich-demokratischen Verfassung mit den Menschenrechten im Zentrum. Die in der Europäischen Union (EU) verbundenen europäischen Staaten haben sich auf diese rechtliche Grundordnung verpflichtet und schaffen so ein supranationales Rechtssystem mit eigener Gerichtsbarkeit.

Schon in der EU sind Gesetzesentscheidungen häufig schwierig gegenüber den Partnerstaaten durchzusetzen. Umso schwieriger wird die rechtliche Durchsetzung bei Konflikten im globalen Wettstreit der Weltsysteme. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde das Völkerrecht durch die UN-Charta verbindlich und mit dem internationalen Gerichtshof in Den Haag auch mit einer eigenen Gerichtsbarkeit institutionalisiert. Nach den Definitionen des Völkerrechts war der 24. Februar 2022 eindeutig ein Bruch des Völkerrechts, da die Armee eines Staates die Grenzen eines souveränen anderen Staats überschreitet, um dort gegen den Willen dieses Staates einzumarschieren [9]. Die Motivationen des Aggressors spielen dabei keine Rolle. Dabei gehört auch zur Wahrheit, dass nach dem Zweiten Weltkrieg nicht nur autoritäre Staaten das Völkerrecht verletzt haben, sondern auch westliche Demokratien [10].

Dieses Buch ist daher auch ein entschiedenes Plädoyer für die Weiterentwicklung des Völkerrechts und seiner internationalen Gerichtsbarkeit. Nur so lassen sich Konflikte in der Zukunft rechtlich regeln und Kriege wenigstens einschränken. In der Zivilgesellschaft können zwar Rechtsbrecher durch Gesetze nicht von ihren Taten abgehalten werden. Aber es gibt für alle verbindliche Normen, deren Nichtbeachtung Konsequenzen hat. Auch in internationalen Konflikten gilt: Nur wenn die Verantwortlichen kriegerischer Konflikte wissen, dass sie sich für Ihre Taten vor einem internationalen Gericht verantworten

müssen, entsteht auch in der internationalen Welt Rechtsbewusstsein und Rechtssicherheit.

Komplexe Systemdynamik führt nicht von selbst zur Entwicklung einer friedlichen Zivilgesellschaft, wie Hegel in seinem Glauben an eine sich entwickelnde Weltvernunft annahm. Aus Hegelscher Sicht mag man geneigt sein, den 24. Februar 2022 als „List der Vernunft“ zu lesen, mit der Europa durch den beschleunigten Einstieg in Zukunftstechnologien schneller zur Vernunft der Nachhaltigkeit gezwungen wurde. Ein Studium der Mathematik dynamischer Systeme zeigt aber auch, wie der Absturz in Chaos und Vernichtung möglich ist. Zudem ist die komplexe Dynamik einer Zivilisation nicht mit Strömungsdynamik in der Physik zu verwechseln. Statt Moleküle sind hier bewusste Individuen die Elemente der komplexen Systeme, die Absichten und Interessen verfolgen. Daher bedarf es normativer Regelung durch das Recht und seine Durchsetzung.

Das heutige Völkerrecht geht vor allem auf die Zeit der Aufklärung zurück, in der Kants Schrift „Zum ewigen Frieden“ grundlegend war [11]. Rechtswissenschaftlich erlebte das Völkerrecht nach dem Ersten Weltkrieg eine erste Blütezeit in den damaligen Nachkriegsdemokratien. Die Gründung des Völkerbunds schien eine neue institutionelle Rechtsbasis in Europa einzuleiten, die aber durch den Zivilisationsbruch des nationalsozialistischen Deutschlands mit seiner imperialistischen Eroberungspolitik zerbrach. Das nationalsozialistische Deutschland versuchte seine Expansion zunächst als Restauration und Revision der Vorkriegsordnung zu legitimieren, um die verstreute und getrennte deutsche Bevölkerung wieder „heim ins Reich“ zu holen. Der Vertrag von München 1938 und die Appeasement-Politik der Westmächte gegenüber dem deutschen Revisionismus ist eine vielfach bemühte Analogie zur russischen Legitimation des 24. Februar 2022 und zu den „Russland-Verstehern“ im Westen, die diese Entwicklung mit ermöglichten.

Hinter der politisch-rechtlichen Auseinandersetzung in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, die zum Zweiten Weltkrieg führte, steht einer der bemerkenswertesten Höhepunkte der Rechtsphilosophie der Neuzeit, der bis heute den Kampf um das Völkerrecht als rechtlich verbindlichen Maßstab internationaler Konflikte prägt. Gemeint ist die Auseinandersetzung zwischen Hans Kelsen als einem maßgebenden Begründer einer demokratischen Staatsrechtslehre und

des internationalen Völkerrechts gegen Carl Schmitt, der häufig als „Kronjurist“ des NS-Regimes bezeichnet wird [12]. Tatsächlich rechtfertigt Schmitt allgemein den Einsatz von kriegerischer Gewalt, um den imperialen Anspruch autoritärer Regime im Kampf des Stärkeren und Überlegenen durchzusetzen. Daher ist er als Antipode zum internationalen Völkerrecht mit dem Gewaltverbot der UN und den Menschen- und Freiheitsrechten im Zentrum bis heute von bleibender Aktualität.

Zur Bewältigung der Konflikte und Herausforderungen des 21. Jahrhunderts reicht also mathematische Analyse und Modellierung komplexer Systemdynamik nicht aus. Es bedarf zusätzlich der Begründung und Durchsetzung von Normen, die der Orientierung und Zielsetzung menschlichen Entscheidens und Handelns dienen. Es bedarf einer normativen Logik des Rechts, die auf Gewaltverbot bei internationalen Konflikten und den Menschen- und Freiheitsrechten gründet. Die übergeordnete Norm für das 21. Jahrhundert ist das Gebot der Nachhaltigkeit, um die Zukunft dieses Planeten zu sichern (siehe auch Kapitel 7). Die Begründung für diese Forderung liefern mathematische Analysen komplexer ökologischer, ökonomischer und sozialer Modelle. Der 24. Februar 2022 ist auf den ersten Blick ein Rückfall in die Monstrosität des 20. Jahrhunderts. Am Ende könnte dieser Kulminationspunkt auch beschleunigend auf die Entwicklung einer nachhaltigen Zukunft gewirkt haben. Der Preis für diesen Phasenübergang war aber, wie so häufig in der Weltgeschichte, das Leid und Elend von Millionen von Menschen.



Zusatzmaterial

## LITERATUR

1. Conrady KO (1994) Goethe. Leben und Werk. Artemis & Winkler: Zürich, S. 565.
2. Mainzer K (2007) Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind. Springer: Berlin 5. Auflage.
3. von Clausewitz C (2016) Vom Kriege. Vollständige Ausgabe der acht Bücher. Edition Holzinger: Berlin.
4. Arthur WB (1989) Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. In: The Economic Journal 99, S. 116–131.

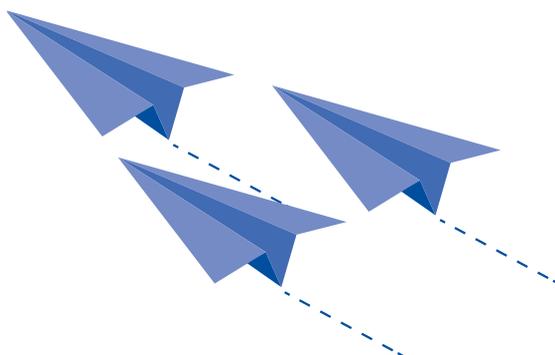
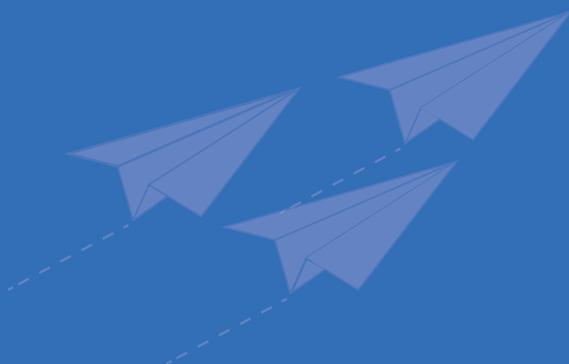
5. Schumpeter JA (2005) Kapitalismus, Sozialismus und Demokratie. UTB: Stuttgart 2005, 7. Kapitel: „Die Eröffnung neuer, fremder oder einheimischer Märkte und die organisatorische Entwicklung vom Handwerksbetrieb und der Fabrik zu solchen Konzernen wie dem U.S.-Steel illustrieren den gleichen Prozess einer industriellen Mutation – wenn ich diesen biologischen Ausdruck verwenden darf –, der unaufhörlich die Wirtschaftsstruktur von innen heraus revolutioniert, unaufhörlich die alte Struktur zerstört und unaufhörlich eine neue schafft. Dieser Prozess der ‚schöpferischen Zerstörung‘ ist das für den Kapitalismus wesentliche Faktum. Darin besteht der Kapitalismus und darin muss auch jedes kapitalistische Gebilde leben.“
6. Hölderlin F (1953) Sämtliche Werke. 6 Bände, Band 2, Cotta: Stuttgart, S. 191.
7. Um global nachhaltige Strukturen zu schaffen, haben sich die Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen 17 Ziele bis 2030 gesetzt, die in der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung festgehalten sind.
8. Offizielle Bezeichnung der Russischen Föderation für den Krieg gegen die Ukraine.
9. Erlass einer einstweiligen Anordnung nach Art. 41 des IGH-Statuts wegen des russischen Überfalls auf die Ukraine 2022: Russland muss die militärische Gewalt in der Ukraine sofort einstellen. Dass Russen in der Ostukraine vor einem Völkermord geschützt werden müssten, hatte Russland zur Rechtfertigung seiner Invasion zwar behauptet, konnte dem Gericht dafür aber keine Beweise vorlegen.
10. Nach dem Angriff der drei Staaten Großbritannien, Frankreich und Israel auf das damals bereits formal souveräne Ägypten („Suez-Krise“) brachten die USA und die Sowjetunion das anglo-französische Unternehmen vor die UNO und erzwangen auf diesem diplomatischen Weg den Rückzug der französischen, britischen und israelischen Truppen aus den Gebieten, die sie in Ägypten besetzt hatten. Im Dezember 1956 wurde eine UN-Friedenstruppe an die israelisch-ägyptische Grenze verlegt, im März 1957 die Krise beigelegt.
11. Kant I (1900ff), Gesammelte Schriften. Hrsg.: Bd. 1–22 Preussische Akademie der Wissenschaften, Bd. 23 Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, ab Bd. 24 Akademie

der Wissenschaften zu Göttingen: Berlin 1900ff., AA VIII, 380.

12. Gangl M (Hrsg.) (2011). Die Weimarer Staatsrechtsdebatte. Nomos: Baden-Baden.



## 2 DYNAMIK KOMPLEXER SYSTEME



Komplexitätsforschung führt unterschiedliche Denkansätze zusammen, die aus den verschiedenen Wissenschaften gewonnen werden [1]. Einerseits sind die Wissenschaften heute hoch ausdifferenziert und in einer komplexen Vielfalt von Einzeldisziplinen spezialisiert. Andererseits haben es Wissenschaften selbst in Natur und Gesellschaft mit hochkomplexen Systemen zu tun – von komplexen atomaren, molekularen und zellulären Systemen in der Natur bis zu komplexen sozialen und wirtschaftlichen Systemen in der Gesellschaft. Komplexitätsforschung beschäftigt sich fachübergreifend mit der Frage, wie durch die Wechselwirkung vieler Elemente eines komplexen Systems (z. B. Moleküle in Materialien, Zellen in Organismen oder Menschen in Märkten und Organisationen) Ordnungen und Strukturen entstehen können, aber auch Chaos und Zusammenbrüche. Komplexitätsforschung hat das Ziel, Chaos, Spannungen und Konflikte in komplexen Systemen zu erkennen und ihre Ursachen zu verstehen, um daraus Einsichten für neue Gestaltungspotenziale der Systeme zu gewinnen.

Dazu werden neue Grundbegriffe, Messmethoden, Modelle und Algorithmen eingeführt. So lassen sich komplexe Ordnungen durch Ordnungsparameter charakterisieren. Ordnungen entstehen ebenso wie Chaos und Zerfall in kritischen Zuständen, die von Kontrollparametern eines Systems empfindlich abhängen oder sich selbst organisieren. Diese ausgezeichneten Zustände werden häufig auch Attraktoren genannt, da die Dynamik eines Systems quasi wie in einen Wasserstrudel hineingezogen wird. Komplexe Muster von Zeitreihen und anderen Kriterien dienen dazu, im Vorfeld kritische Situationen aus Messdaten zu erkennen und rechtzeitig Vorkehrungen zu treffen. Dabei spielen Computermodelle eine entscheidende Rolle. Die Dynamik komplexer Systeme in Natur und Gesellschaft lässt sich erst seit wenigen Jahren in Simulationsmodellen analysieren, die durch die gesteigerten Rechenkapazitäten von Computern möglich wurden.

## DEFINITION DYNAMISCHER SYSTEME

Es sind nicht nur die Massen der Daten, sondern ihre vielfältigen Wechselwirkungen, die eine Berechnung erschweren. Handelt es sich um prinzipielle Grenzen der Berechenbarkeit, an die wir damit stoßen?

Allgemein besteht ein dynamisches System aus einer Menge von Elementen, die sich in der Zeit verändern [2]. Die Wechselwirkungen der mikroskopischen Zustände der Elemente bestimmen den makroskopischen Gesamtzustand des Systems. So ist in einem Planetensystem der Zustand eines Planeten zu einem Zeitpunkt durch seinen Ort und seine Geschwindigkeit bestimmt. Es kann sich aber auch um den Bewegungszustand eines Moleküls in einem Gas, den Erregungszustand einer Nervenzelle in einem neuronalen Netz oder den Zustand einer Population in einem ökologischen System handeln. Die Dynamik des Systems, d. h. die Änderung der Systemzustände in der Zeit, wird durch zeitabhängige Gleichungen (z. B. Differentialgleichungen) beschrieben.



Definition

Bei deterministischen Systemen ist jeder zukünftige Zustand durch den Gegenwartszustand eindeutig bestimmt.

## LINEARE DYNAMIK

Ein einfaches Beispiel ist ein harmonischer Oszillator. Bei einer Masse, die an einer Feder befestigt ist, führt eine kleine Auslenkung zu einer kleinen Schwingung, während eine große Auslenkung eine große Schwingung als Wirkung verursacht. In linearen Systemen sind Ursachen und Wirkungen proportional (Abb. 2.1, a). Mathematisch erhalten wir dann eine Gleichung der Form  $f(x) = c \cdot x$  mit  $x$ -Werten (z. B. für die Auslenkung eines Körpers an einer Feder), den davon abhängenden Funktionswerten  $f(x)$  (z. B. der Kraft auf den Körper) und einer Proportionalitätskonstanten  $c$  (z. B. abhängig vom Material der Feder). Da diese Gleichung im Koordinatensystem eine Gerade mit der Steigung  $c$  darstellt, heißt sie linear.

## ZUSTANDSRAUM DYNAMISCHER SYSTEME

Eine Lösung dieser Bewegungsgleichungen lässt sich als Zeitreihe des Orts in Abhängigkeit von der Zeit graphisch darstellen (Abb. 2.1, b). Einer regulären Schwingung entlang der Zeitachse (z. B. bei einem Pendel) entspricht eine geschlossene Bahn (Trajektorie) im Zustandsraum, in dem alle Bewegungszustände des dynamischen Systems als Punkte dargestellt sind. Die Punkte, also die Bewegungszustände, sind durch die beiden Koordinaten des Ortes und der Geschwindigkeit

der Masse zu einem Zeitpunkt dargestellt (Abb. 2.1, *c*). Wegen der Federschwingung kehrt die Masse in diesem Fall immer wieder in ihren Ausgangszustand zurück und bildet daher eine geschlossene Kurve im Zustandsraum. Verschiedene Anfangszustände führen zu verschiedenen Zustandskurven [3]. Im Zustandsraum erkennen wir also die Dynamik eines linearen Oszillators für alle möglichen Situationen vollständig. Eine Kausalitätsanalyse ist in diesem Fall nicht nur vollständig durchführbar, sondern auch berechenbar. Das ist die Welt, an die Laplace glaubte: Unter diesen Bedingungen wäre die gesamte Natur berechenbar.