
IASS DISCUSSION PAPER

Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)

Potsdam, März 2017

Systemische Risiken und Dynamische Strukturen

Eine konzeptionelle Ortsbestimmung

Klaus Lucas, Carlo C. Jaeger, Ortwin Renn

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Merkmale systemischer Risiken	5
3. Klimarisiken als Paradebeispiel für systemische Risiken	7
4. Dynamische Strukturen	9
5. Modellsysteme	14
5.1 Strömungsmuster	14
5.2 Chemische Muster	15
5.3 Laserlicht	16
6. Erkenntnisse	18
6.1 Makroebene	18
6.2 Mikroebene	19
7. Interdisziplinäre Ausstrahlung: Potenziale und Grenzen	20
8. Mathematische Formulierungen	23
9. Fallstudie: die globale Finanzkrise	27
10. Ausblick	32
Literatur	35
Zu den Autoren	39

1. Einleitung

Angesichts der weltweit steigenden Lebenserwartung und der Verbesserung der Lebensverhältnisse in der überwiegenden Zahl der Länder kann die Weltgemeinschaft zweifellos stolz darauf sein, trotz erheblichen Bevölkerungswachstums und Ressourcenknappheit die Lebensverhältnisse der Menschen insgesamt verbessert und ihre Lebenschancen erhöht zu haben. Aber diese Errungenschaften sind für die Zukunft keineswegs gesichert und die Erfolge sind zudem höchst ungleich über die Welt verteilt. Sieht man sich nämlich die weltweiten ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Wandlungerscheinungen näher an, dann sieht die Bilanz weniger günstig aus. Hinter vielen der positiven Entwicklungen verbirgt sich eine Reihe von versteckten Risiken, die nicht genügend beachtet werden und bei denen die relevanten Akteure wie Regierungen, Wirtschaftsunternehmen oder zivilgesellschaftliche Gruppen weltweit nach wie vor große Probleme haben, sie effektiv zu begrenzen. Das gilt für Risiken wie den Klimawandel, die Verseuchung von Meeren, Gewässern und der Luft, Hungersnöte sowie viele andere ökologische Katastrophen, die Menschen in vielen Ländern der Erde gerade erleben, (und weitere, die sich anbahnen) ebenso wie für die Weltwirtschaftskrise, Erschütterungen der Finanzmärkte, Flüchtlingsströme und andere Krisenbereiche.

Diese schleichenden und die Wohlfahrt der Menschen bedrohenden Risiken lassen sich mit dem Begriff der systemischen Risiken belegen.¹ Die bislang geläufigen Ursache-Wirkungs-Modelle greifen immer weniger in einer Welt, die von systemischer Durchdringung geprägt und durch die technischen, insbesondere kommunikationstechnischen Möglichkeiten in ihren Teilbereichen miteinander so verbunden ist, dass die Wirkung von Eingriffen oft nicht lokal begrenzt bleibt. Dies gilt für die Welt als Ganzes, aber ebenso für ihre zahlreichen Teilsysteme. Aus diesem Grund lassen sich alltägliche Phänomene in Natur, Technik und Gesellschaft nur verstehen, wenn man sie als dynamische Prozesse in komplexen Systemen betrachtet. Anstelle der linearen Vermehrung einzelner Datensätze rücken zunehmend systemische Zusammenhänge ins Zentrum der Analyse. Dies gilt grundsätzlich für alle Systeme und Prozesse, seien es nun solche in der Natur, in der Technik, in der Medizin, in der Wirtschaft oder in der Gesellschaft. In besonderem Maß ist der systemische Blick für die Risikoforschung relevant, in der technische, natürliche und sozioökonomische Prozesse mit gesellschaftlichen Reaktions- und Diskursprozessen interagieren.

Ansätze für eine systemische Risikoforschung liefern insbesondere die mathematisch-naturwissenschaftlichen Erkenntnisse über die dynamische Strukturbildung in komplexen Systemen. Sie haben das Potenzial, geordnete qualitative sowie quantitative Erkenntnisse hervorzubringen. Die Grundlage für eine solche Analyse bietet der Theorie- und Methodenbestand, der sich im Laufe der vergangenen ca. 50 Jahre aus der Beschäftigung mit dynamischen Prozessen zunächst in Physik und Chemie entwickelt hat und der später dann, losgelöst von den naturwissenschaftlichen Besonderheiten und Einschränkungen, auf vielfältige andere Systeme übertragen wurde. Hierbei geht es allgemein um die Frage, wie durch die Wechselwirkung vieler Elemente – seien es Moleküle in Materialien, Zellen in Organismen, Maschinen und Apparate in technischen Anlagen oder schließlich auch Menschen in Märkten und Organisationen – dynamische Strukturen entstehen, miteinander in eine Wechselwirkung treten und sich dabei grundlegend verändern können. Dies schließt auch die Möglichkeit eines funktionalen Zusammenbruchs mit ein, wie der amerikanische Historiker und Nachhaltigkeitsforscher Derek Diamond in seinem Buch *Kollaps* anhand vieler historischer Beispiele nachgewiesen hat (Diamond 2006).

¹ Zur Definition von systemischen Risiken vgl. Schwarcz 2008; Kaufman/Scott 2003; vgl. auch: Renn/Keil 2009, Jaeger 2016.

Muster komplexer dynamischer Strukturen und Prozesse zu identifizieren und zu analysieren ist eine der großen Herausforderungen bei der Analyse und dem Umgang mit systemischen Risiken. Die zeitliche Entwicklung der Strukturbildung und damit die Kernaufgabe der Analyse wird durch Differential- oder Differenzgleichungen, durch Zeitreihenanalysen oder auch durch die direkte Simulation der Wechselwirkungen zwischen den Elementen erfasst. Dabei spielen Computermodelle und Algorithmen eine entscheidende Rolle. Da insbesondere in komplexen Systemen mit Menschen als Agenten Verhaltenswahrscheinlichkeiten für die dynamische Strukturbildung konstitutiv sind, ist insbesondere auch ein stochastisches Element in diesem interdisziplinären Theorie- und Methodenbestand beheimatet. Dabei wird nicht davon ausgegangen, dass es universelle mathematische Gleichungssysteme gibt, die für eine komplexe und dynamische Strukturbildung in allen Domänen der Anwendung in gleichem Maß Geltung beanspruchen, also isomorphe Strukturen voraussetzen.

Kernpunkt unserer Überlegungen ist vielmehr die Hypothese, dass die Erfassung und Analyse der Strukturbildungsprozesse über alle Domänen hinweg nicht nur Hinweise auf Analogien, sondern darüber hinaus homomorphe, also strukturbezogene und analytisch nutzbare Verbindungen zwischen den Domänen nahelegen.

Die Generierung quantitativen Wissens über die dynamische Strukturbildung in komplexen Systemen führt zu einem besseren Verständnis der Systeme, aber nicht notwendigerweise zu einer besseren Berechenbarkeit zukünftiger Entwicklungen. Es ist vielmehr ein prinzipielles Merkmal komplexer Systeme, dass ihre weitere Entwicklung in der Regel eben nicht vorausberechnet werden kann, zumindest nicht im Detail und auf lange Sicht. Jenseits dieser prinzipiellen Einschränkung und auf der Basis empirischen Wissens über ein System lassen sich aber mit Unterstützung durch mathematisch-naturwissenschaftliche Modelle quantitative Einsichten in die dynamischen Prozesse gewinnen. Es ergeben sich insbesondere Aussagen über die mögliche Ausprägung systemischer Brüche und das Risiko ihres Auftretens, Szenarien der zukünftigen Entwicklung sowie quantitative Informationen über Kontrollmöglichkeiten – kurzum: Instrumente, die bei der Handhabung von systemischen Risiken wertvoll sind.

Der folgende Beitrag versucht, auf der Basis interdisziplinären Wissens über komplexe Strukturbildung und deren Dynamik Grundlagen eines Forschungsansatzes zur Identifikation, Analyse und Steuerung (Governance) von systemischen Risiken zu skizzieren. Ziel ist es, die relevanten Wissensbestände aus unterschiedlichen Disziplinen, Denkschulen und Anwendungsgebieten zusammenzutragen und zu einem Methodenansatz für systemische Risikoanalyse zu verdichten.

2. Merkmale systemischer Risiken

Um genauer zu beschreiben, was ein Risiko zu einem systemischen Risiko macht, ist es notwendig, typische Merkmale von systemischen Risiken zu identifizieren. Dabei lassen sich folgende Merkmale erkennen (Renn 2016):

- Systemische Risiken wirken *global* oder zumindest lokal übergreifend (zu den Bedingungen für die Globalität von Risiken vgl. Reusswig 2011). Sie können nicht mehr auf eine bestimmte Region eingegrenzt werden. Ulrich Beck spricht in diesem Zusammenhang von „entgrenzten“ Risiken (Beck et al. 2004). Solche Risiken können zwar lokal ausgelöst werden, ihre Wirkungen greifen dann aber auf viele andere Regionen über.
- Systemische Risiken sind *eng vernetzt* mit anderen Risiken und strahlen auf unterschiedliche Wirtschafts- und Lebensbereiche aus. Nach Diamond (2006) sind es im Wesentlichen fünf Faktoren, die als vernetzte Systeme zu systembedrohlichen Risiken und Zusammenbrüchen führen: schädliche Interventionen in die Umwelt, Klimaveränderungen, feindliche Nachbarn, Gütertausch im Handel mit anderen und Reaktionen der Gesellschaft auf diese Veränderungen. Systemische Risiken sind in ihren Wirkungen mit den Wirkungsketten anderer Aktivitäten und Ereignisse verknüpft, ohne dass man dies auf den ersten Blick erkennen kann. Der 2013 erschienene Bericht des World Economic Forum zu den globalen Herausforderungen und Risiken bietet viele Beispiele für solche auf den ersten Blick nicht wahrnehmbaren Verknüpfungen von Risiken (World Economic Forum 2013). So sind soziale Ungleichheit, negative Handelsbilanz, Widerstand gegen Klimaschutzmaßnahmen und sogar das Aufkeimen fundamentalistischer Strömungen eng miteinander verwoben. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) hat in einer Vielzahl von Gutachten diese vernetzten Risikobereiche in Analogie zur Medizin als Syndrome bezeichnet. In dem Gutachten des Gremiums finden sich daran anknüpfend Syndrombezeichnungen wie das Sahel-Syndrom (Verwüstung und Versteppung), das Raubbau-Syndrom (Übernutzung von Ressourcen) oder das Kleine-Tiger-Syndrom (zu schnelles und expansives ökonomisches Wachstum). Diese Syndrome weisen auf eine komplexe Verkettung von Ursachen und Wirkungen zu einem Gesamtgefüge miteinander verbundener Risiken hin (WBGU 1999).
- Systemische Risiken sind nicht durch lineare Modelle von Ursache- und Wirkungsketten beschreibbar, sondern folgen *stochastischen Wirkungsbeziehungen* (Metzner 1985). Stochastik bedeutet, dass gleiche Ursachen nicht zu identischen Ergebnissen führen, sondern zu einer Bandbreite von Folgen, die alle nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten (Dubben/Beck-Bornholdt 2006). Die Stochastik hat auch das Weltbild der klassischen Naturwissenschaften stark beeinflusst und verändert. Identische Auslöser können unterschiedliche Wirkungen auslösen, allerdings in einem mathematisch beschreibbaren Raum. Die Wirkungen sind keineswegs beliebig oder rein zufällig, sondern folgen häufig eindeutig zu bestimmenden Verteilungsmustern von Folgen, die durch Wahrscheinlichkeits-funktionen abgebildet werden können.

■ Nicht lineare Beziehungen mit Triggerpunkten oder Triggerflächen sind ein weiteres wesentliches Merkmal systemischer Risiken. Das bedeutet, dass man eine Aktivität lange Zeit fortsetzen kann, ohne dass es zu nennenswerten Auswirkungen kommt. Sobald aber ein bestimmter Punkt überschritten ist oder man sich in eine sensitive Ebene begibt, tritt die Folge mit großer Wucht ein und lässt sich oft auch nicht mehr korrigieren. In der Nähe des Triggerpunkts können schon marginale Veränderungen einer oder mehrerer Ursachen zu unerwartet großen Ausschlägen bei den Wirkungen führen. Besonders eindrucksvoll ist dies beim sog. Schmetterlingseffekt (Lorenz 1995). Nach dieser Metapher soll das Schlagen eines Schmetterlingsflügels in einem Gebiet eine Wetterkatastrophe in einem anderen, weit entfernten Gebiet auslösen können. Viele der systemischen Risiken weisen diesen nicht linearen Funktionsverlauf auf. Man kann sich lange Zeit in Sicherheit wähnen, weil die eigenen Handlungen offenkundig keine Änderungen im umgebenden System auslösen. Dann aber tritt plötzlich der Schaltereffekt auf. Zu diesem Zeitpunkt ist es aber in der Regel entweder gar nicht, nur mit extrem großen Aufwand oder erst nach langen Zeiträumen möglich, den Schalter wieder auf „normal“ zurückzusetzen.

■ Ein letztes Kennzeichen systemischer Risiken ist ihre *Unterschätzung durch Politik und Gesellschaft* (NRC 2010). Es ist keineswegs so, dass die meisten Menschen diese Risiken nicht kennen würden. Viele der systemischen Risiken sind wissenschaftlich identifiziert, analysiert und bewertet worden. Einige davon wie etwa die Risiken für das Weltklima oder Pandemien stehen sogar im Mittelpunkt vieler wissenschaftlicher und politischer Aktivitäten. Auch die Bevölkerung kennt diese Risiken und stuft sie als „relevant“ ein (Peters/Heinrichs 2005). Allerdings zeigt sich in der Praxis, dass die bisherige Bilanz der Wirksamkeit von Risiko begrenzenden und regulierenden Maßnahmen außerordentlich mager ausfällt: „A great deal is known about a range of solutions for many of our problems. But educational, economic, and bureaucratic barriers as well as vested interests, too often stand in the way of giving those potential solutions the attention they need and promoting public discussion of them“ (Ehrlich/Ehrlich 2009: 367; vgl. zur negativen Bilanz des Klimaschutzes gemessen an den CO₂-Emissionen: Peters et al. 2012; Randers 2012: 146). Die meisten Menschen sind sich also dieser Risiken bewusst, tun aber wenig, um sie weiter einzugrenzen oder abzumildern (Fischhoff 2007; Dietz et al. 2003).

Viele Institutionen haben in den letzten Jahren versucht, umfassende Listen der systemischen Risiken aufzustellen und sie nach Wahrscheinlichkeit und Ausmaß ihres Schadenspotenzials zu ordnen. An erster Stelle steht die umfangreiche und methodisch sehr aufwendige Untersuchung des World Economic Forum (WEF), das jedes Jahr eine Liste der besonders bedrohlichen systemischen Risiken aufstellt. Ähnliche Listen werden von der OECD, der Swiss Re, der Bertelsmann-Stiftung und der WorldRisk-Initiative erstellt.² Bei allen Unterschieden in der Vorgehensweise und in der Form der Listenbildung sind die Resultate einander erstaunlich ähnlich: Raubbau an den natürlichen Ressourcen, Klimabeeinflussung, Übernahme riskanter Aktivitäten aufgrund von Selbstüberschätzung und mangelnde Resilienz der jeweiligen Funktionsbereiche gegenüber ungewöhnlichen und als unwahrscheinlich eingeschätzten Ereignissen belegen in ihren unterschiedlichen Ausprägungen die Spitzenplätze der Risikolisten. Interessant ist dabei die zentrale Position der Steuerungsdefizite (Governance Deficits). Je komplexer und undurchschaubarer die Beziehungen und Vernetzungen in der globalen Welt werden, desto schwieriger ist es, Ordnungssysteme zu erstellen oder aufrechtzuerhalten, denen es gelingt, mit vertretbarem Aufwand Chancen zu verbessern und Risiken zu begrenzen. Schon heute sind die herkömmlichen Instrumente politischer Steuerung überfordert. Mit dem neuen Schlagwort „Good Governance“ werden daher Bestrebungen angesprochen, die den konventionellen politischen Entscheidungsträgern aus Parlament und Regierung, den Akteuren aus der Privatwirtschaft, den Wissensinstitutionen und der Zivilgesellschaft an die Seite gestellt werden (Weiss 2000). Leider wird das Potenzial dieser verschiedenen Zuträger von Steuerungsleistungen noch zu wenig effektiv genutzt, um greifbare Erfolge bei der Bekämpfung systemischer Risiken vorweisen zu können.

² Originalquellen: World Economic Forum 2013; OECD 2013b; Swiss Re 2012; Löfstedt 2003; Arpe et al. 2012.

Was steht auf dem Spiel? Systemische Risiken sind Bedrohungen, die wegen ihres globalen und vernetzten Charakters zu multiplen Kaskaden von Auswirkungen führen können und dabei grenz- und funktionsübergreifend Schäden hervorrufen. Wenn beispielsweise die vom Menschen ausgelösten Emissionen von Treibhausgasen nicht effektiv begrenzt werden, wird es mit großer Wahrscheinlichkeit zu erheblichen Verschiebungen der Klimazonen auf der Welt kommen. Dies wird wiederum Ernährungsengpässe, die Ausbreitung neuer Krankheiten und Migrationsbewegungen in großem Ausmaß nach sich ziehen.³ Ganze Inselketten könnten im Meer versinken und Völkerwanderungen im großen Stil verursachen. Eine Reihe von sekundären Effekten ist zu erwarten, die über die Vernetzungen der Auswirkungsketten negative Rückwirkungen auf das Gesamtsystem auslösen können. Dazu gehören durch Migration und Entwurzelung ausgelöste Versorgungsengpässe, durch Frustration über die mangelnde Handlungsfähigkeit der reichen Nationen ausgelöste Aggressionen in Form von fundamentalistischen Strömungen und terroristischen Anschlägen sowie durch mangelnde Ernährungsgrundlagen ausgelöste Anomie mit entsprechenden Folgen für Kriminalität und Verarmung und die durch unterschiedliche Betroffenheiten vom Klimawandel induzierte Ungleichheit der Lebenschancen. Im Rahmen der sozialen und kulturellen Risiken führt die zunehmende Unzufriedenheit mit ungerechten Vermögens- und Machtverhältnissen zu sozialer Unzufriedenheit bis hin zu aggressiven Handlungen wie sozialem Aufruhr, Fanatismus und Terrorismus (Thurner 2012). Dass dies alles ohne schwerwiegende Erschütterungen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit und Vertrauenswürdigkeit politischer und wirtschaftlicher Ordnungssysteme erfolgen wird, glauben nicht einmal die Optimisten.

3. Klimarisiken als Paradebeispiel für systemische Risiken

Der vom Menschen verursachte Klimawandel ist ein Paradebeispiel für alle oben genannten Merkmale systemischer Risiken.

Die Klimarisiken sind *erstens* globaler Natur: Unabhängig davon, wo die Emissionen stattfinden, sind die Auswirkungen weltweit spürbar. Jeder Einzelne trägt nur marginal zur Emission von klimaschädlichen Gasen bei, aber insgesamt ist der Ausstoß so hoch, dass er die Senkenkapazität der Natur bei Weitem übersteigt (Rosa/Dietz 2010).

Die Klimarisiken sind *zweitens* eng mit anderen wirtschaftlichen und sozialen Krisenerscheinungen vernetzt. Sie verstärken auftretende Dürren und Hungersnöte, führen zu einer Zunahme extremer Wetterereignisse und bedrohen wegen des ansteigenden Meeresspiegels tiefer liegende Siedlungen (NRC 2010). Diese Zunahme von sekundären Lebensrisiken kann Wanderungsbewegungen, soziale Unruhen und die Entwicklung neuer fundamentalistischer Strömungen beschleunigen (Reusswig 2011). Fundamentalistische Bauernfänger finden immer dort großes Gehör, wo die Situation als ungerecht

³ Zu den weltweiten Auswirkungen vgl. National Research Council 2010: S. 102–105.; für Deutschland vgl. Gerstengarbe/Welzer 2013.

empfunden wird und man sonst keinen Weg mehr sieht, an diesem Missstand etwas zu ändern (Kandil 1983). Diese Voraussetzung liegt beim Klimawandel vor. Am meisten leiden die Menschen, die zur Entstehung des Klimawandels wenig oder gar nichts beigetragen haben.

Die Klimarisiken sind *drittens* exemplarisch für stochastische und nicht lineare Wirkungsketten (Risbey/Kandlikar 2007). Da die Atmosphäre wesentlich komplexer reagiert als das Treibhaus im Garten, gibt es eine Menge an intervenierenden, d. h. die Kausalkette beeinflussenden Variablen, die den Klimateffekt entweder verstärken oder abschwächen. Große Computermodelle sind die einzige Möglichkeit, diese Vielzahl von Einflussfaktoren in ihrer Dynamik zu erfassen und ihren jeweiligen Nettoeffekt zu berechnen (WBGU 1999). Dabei müssen auf der einen Seite stochastische Wirkungsbeziehungen mithilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung einbezogen und auf der anderen Seite nicht lineare Beziehungsmuster in der Vielzahl der simulierten Funktionsverläufe berücksichtigt werden (Manning 2006). Dies führt wie bei allen Risiken dazu, dass man Bedrohungen nicht mit Sicherheit beweisen und gelegentlich auch Scheinkorrelationen unterliegen kann.

Der grundlegende Charakter der systemischen Risiken des Klimawandels, komplex, unsicher und ambivalent zu sein, ändert sich auch nicht, wenn die Wissenschaftler mehr Klimaforschung betreiben. Die Gesellschaft wird mit einem Rest an Unsicherheit und einem hohen Maß an Ungewissheit über plötzliche Kippeffekte im Klimabereich leben müssen (Swart et al. 2009; Malone 2009). Gewissheiten wird es hier nie geben (Spiegelhalter/Riesch 2011). Diese Tatsache wird von den Klimaskeptikern gerne als Beweis dafür gesehen, dass die These vom anthropogen veränderten Klimawandel auf tönernen Füßen steht (vgl. z. B. Vahrenholt/Lüning 2012; Olsen 2010). Diese Behauptung ist jedoch wenig überzeugend. Immer dann, wenn Forschungen auf komplexe und nicht lineare Systeme ausgerichtet sind, wird es, gleichgültig wie viel Geld und wissenschaftlichen Sachverstand man auch investieren mag, zu Aussagen mit entsprechenden Unsicherheitsräumen und mehrdeutigen Interpretationsmöglichkeiten kommen (Dubois/Guyonnet 2011). Ihre grundsätzliche Relevanz wird davon nicht berührt.

Dies führt zum *vierten* und letzten Merkmal: der faktischen Unterschätzung systemischer Risiken beim Klimawandel. Seine Globalität führt dazu, dass jeder Einzelne, der zum Risiko beiträgt, davon ausgeht, dass er nur marginal an dem Risiko beteiligt sei und sich gar nichts ändere, wenn er diesen Beitrag (etwa in der Form, dass er durch Autofahren Kohlendioxid in die Luft entlässt) unterlassen würde. Dies wird durch die Nichtlinearität der Prozesse noch verstärkt: Es geschieht lange so gut wie nichts, bis es zu einem, dann schwer zu beherrschenden Schadensfall kommt. Menschen lernen überwiegend durch Versuch und Irrtum. Tritt der Irrtum nicht ein oder wird er nicht wahrgenommen, gibt es wenig Anreiz, ein Verhalten zu unterlassen oder zu ändern. Schließlich führt die Stochastik dazu, dass man sich je nach Präferenz für die eine oder andere Seite der Normalverteilung entscheiden kann. Möchte man, dass andere etwas tun, um ein Risiko zu begrenzen, fokussiert man sich gerne auf das eine Ende der Normalverteilung („better safe than sorry“). Dann sind die Restrisiken mit einer geringen Wahrscheinlichkeit im Blickfeld. Glaubt man aber, dass andere einen dazu veranlassen möchten, das eigene Verhalten zu ändern (etwa weniger Auto zu fahren), fokussiert man sich gerne auf das andere Ende der Normalverteilung („it won't happen to me“). Dann klammert man sich an die Restwahrscheinlichkeiten, dass alles nicht so schlimm ausgehen wird, wie nach dem Median der Verteilung zu vermuten wäre. Schließlich sind systemische Risiken häufig auch unter Fachleuten umstritten, sodass man sich aus der ganzen Bandbreite der wissenschaftlichen Meinungsäußerungen die Einschätzung aussuchen kann, die einem intuitiv am meisten liegt. Folgerichtig sind im sozialen Diskurs systemische Risiken häufig hoch moralisiert, aber selten mit wirksamen Risikoreduktionsmaßnahmen verbunden.

Aus dieser Beschreibung geht deutlich hervor, dass systemische Risiken konkret schwer zu beschreiben, geschweige denn vorherzusagen sind, dass sie ein hohes Schadenspotenzial beinhalten, sofern sie nicht erkannt und gesteuert werden, und im öffentlichen Diskurs zwar zu hohen gegenseitigen Schuldzuweisungen, aber selten zu wirksamen Gegenmaßnahmen führen. Umso wichtiger ist es deshalb, die Struktur und Dynamik solcher komplexen Risiken besser zu verstehen und aus diesem Verständnis heraus auch wirksame Maßnahmen für einen effektiven, effizienten, resilienten und in den Auswirkungen fair verteilten Umgang mit den betreffenden Risiken abzuleiten.

4. Dynamische Strukturen

Die beschriebenen Merkmale systemischer Risiken finden sich auch und insbesondere in den dynamischen Strukturen von Natur, Technik und Gesellschaft. In diesen Systemen beobachten wir vielfältige einer flüchtigen und nicht vorhersagbaren Dynamik unterworfenen Muster wie Strömungswirbel in Flüssen oder der Atmosphäre, Verkehrsstaus auf der Autobahn, Paniksituationen in Menschenansammlungen, Börsencrashes, die Ausbreitung von Epidemien, Flüchtlingsströme, radikale und fundamentalistische Ideologien und viele andere mehr.

Trotz ihrer Vielfalt weist die dynamische Strukturbildung in komplexen Systemen eine Reihe gemeinsamer Merkmale auf, die empirisch in ganz unterschiedlichen Systemen nachgewiesen und für das Verständnis von systemischen Risiken relevant sind.

Dynamische Strukturbildung ist agentenbasiert, d. h., sie entsteht durch die Eigenschaften von und durch Wechselwirkungen zwischen den elementaren Wirkungsgrößen eines Systems. Das können Moleküle sein, beispielsweise im Fall von Strömungsmustern oder schwingenden chemischen Reaktionen oder Sandkörner bei Dünenmustern.



Dünenmuster bei
Huacachina, Peru

© iStock/saiko3p

Bei der biologischen Evolution sind Gene die Agenten, bei Strukturbildungsprozessen im Gehirn die Neuronen. In technischen Systemen können Anlagenteile und Betriebsparameter mit ihren Wechselwirkungen Strukturen unterschiedlicher Art entstehen lassen. In der Wirtschaft interagieren Menschen in vielen ökonomischen Funktionen und schaffen Strukturen in Märkten oder Unternehmen. Auch in Gesellschaftssystemen entstehen Strukturen durch die Eigenschaften und Wechselwirkungen von Agenten, seien es nun die Ameisen in einer Ameisenpopulation beim Aufbau ihres Straßennetzes, Bürger einer Gesellschaft bei der Bildung von politischen Strukturen oder bei der Teilnahme an Finanzgeschäften oder auch Teilnehmer einer Verkehrssituation oder Menschenmenge.

Dynamische Strukturbildung ist kommunikationsbasiert, d. h., sie entsteht durch die lokale Kommunikation zwischen den Agenten, wobei sich die gebildeten Strukturen über im Vergleich zur lokalen Kommunikation um viele Größenordnungen umfangreichere Dimensionen erstrecken können. Wechselwirkungen bei Molekülen mit einer kurzen Reichweite im Nanometerbereich erzeugen Strukturen in makroskopischen Dimensionen, etwa Wirbelströmungen, Wolken oder chemische Muster.



Wolken über Grimmen,
Mecklenburg-Vorpommern

© Dirk Ingo Franke,
via Wikimedia Commons

Beim Herzschlag lösen elektrische Wechselwirkungen der Zellen Aktionspotenziale aus, die zu oszillierenden Kontraktionen in Form makroskopischer dynamischer Strukturen führen. Im Gehirn bilden sich durch das synchrone Feuern der Neuronen neuronale Cluster und Muster, die mit mentalen Zuständen als dynamischen Strukturen korreliert sind. Die dynamischen Strukturen des gesellschaftlichen Zusammenlebens von Tierpopulationen bedürfen keines Anführers mit Regelkompetenz, sondern interaktiver Netzwerke der Kommunikation. In der aktuellen Flüchtlingskrise sind es die heute verfügbaren mobilen Kommunikationstechnologien, die zu den beobachteten massenhaft geordneten Bewegungsstrukturen geführt haben.

Dynamische Strukturbildung findet grundsätzlich nur in offenen Systemen statt, also solchen, die durch den Durchfluss von Energie, Materie und Information gekennzeichnet sind. In der Natur genügt bereits der Durchfluss von Energie und Materie, um zu dynamischer Strukturbildung zu führen, z. B. bei der Entstehung von Wolkenmustern, Sanddünen etc. Chemische Muster können in Systemen entstehen, die von geeigneten Materieströmen durchflossen werden. Auf einer Autobahn kommt es zu lokalen Verkehrsstaus, in großen Menschenansammlungen zu Panikkatastrophen, wenn der zunehmende Zufluss von Autos bzw. von Menschen nicht ausreichend kontrolliert wird. In Finanz- und Wirtschaftsmärkten ist der Durchfluss von Informationen eine notwendige Bedingung für die dynamische Strukturbildung.

Dynamische Strukturbildung ist sensibel, d. h., sie reagiert empfindlich auf Störungen und ist daher auf längere Sicht nicht vorhersagbar. Aus der Wetterforschung stammt die bekannte Metapher des Schmetterlingseffektes, dem zufolge ein kleiner Schwankungseffekt, wie er grundsätzlich nicht vermeidbar ist, zu makroskopisch neuen, ggf. katastrophalen Wetterstrukturen führen kann. In der Wirtschaft wird vielfach beobachtet, wie sich der Wettbewerb zwischen zwei konkurrierenden Produkten durch zufällige kleine Fluktuationen entscheidet, z. B. durch minimale Marktvorteile eines Produkts in der Anfangsphase. In der arabischen Welt hat die Selbstverbrennung eines Gemüsehändlers in Tunesien einen revolutionären Flächenbrand ausgelöst, die „Arabellion“. Auf einer dicht befahrenen Autobahn kann eine momentane Unaufmerksamkeit eines Verkehrsteilnehmers einen kilometerlangen Stau auslösen.

Dynamische Strukturbildung hat emergente Eigenschaften, besitzt also die Fähigkeit, auf dem Weg der Selbstorganisation Eigenschaften zu erzeugen, die sich nicht aus dem isolierten Verhalten der Systembestandteile erklären lassen. Einzelne Moleküle bewegen sich chaotisch und bilden keine geordneten Wirbel – im Gegensatz zu einem molekularen System aus unzählig vielen Molekülen, wenn die äußeren und inneren Bedingungen dafür günstig sind. Einzelne Neuronen denken und fühlen nicht, während ein Gehirn als System aus Neuronen diese Fähigkeit durchaus entwickelt. Einzelne Personen haben oft gemäßigte politische Ansichten, die bei Massenversammlungen unter geeigneten internen und externen Einflüssen in völlig radikale und irrationale Meinungsbildung umschlagen können.



Anti-Atom-Demo in Hamburg, März 2011

© ChrGermany,
via Wikimedia Commons

Ein regelmäßiger Herzschlag kann im Fall einer Veränderung innerer und äußerer Bedingungen einen Periode verdoppelnden Kaskadenverlauf beginnen, der schließlich zum Zustand des chaotischen Kammerflimmerns emergiert.

Dynamische Strukturbildung ist durch die Existenz unterschiedlicher Zeitskalen gekennzeichnet, wobei in langsamen Teilprozessen kritische Situationen entstehen, in denen das System dann sprunghaft in ein neues Verhalten übergeht. Ein Gewässer, das Umweltgiften ausgesetzt ist, verändert in einem langsamen Teilprozess seine biologische Qualität und damit die in ihm heimische Artenvielfalt, bis plötzlich bei zunehmendem Gifteintrag ein Umkippen erfolgt, mit katastrophalen Folgen z. B. für die Fischpopulation. Die über Jahrzehnte langsam zunehmende Hinwendung weiter Kreise der arabischen Gesellschaften zu islamistischen Ideologien hat in jüngerer Vergangenheit zur plötzlichen Radikalisierung ganzer Bevölkerungsgruppen mit den Begleiterscheinungen des arabisch-islamistischen Terrors geführt.

Dynamische Strukturbildung ist pfadabhängig, d. h., die dynamische Entwicklung des Systems hängt nicht nur vom Zufall bei Strukturbrüchen, sondern insbesondere auch von deren Vorgeschichte ab. Die spezielle Ausprägung der Muster in chemisch-autokatalytisch reaktionsfähigen Systemen wird durch die zeitliche Reihenfolge der zugeführten Substanzen beeinflusst. Finanzmärkte zeigen Nachwirkungen und Erinnerungen an vergangene Ereignisse.



Deutsche Börse in Frankfurt am Main, fotografiert im März 2008

© Christoph F. Siekermann, via Wikimedia Commons

Ein Verkehrsstau auf einer dicht befahrenen Autobahn hängt vom Verhalten der Verkehrsteilnehmer und dem Straßenzustand zu einem bereits seit Stunden vergangenen Zeitpunkt ab. Die gesellschaftlichen Brüche in großen Teile der arabischen Welt sind nicht denkbar ohne die Ereignisse während der Kolonialgeschichte und die zunehmende Destabilisierung der Gesellschaften während der Unterdrückung durch externe und interne Machthaber in der jüngsten Zeit.

Dynamische Strukturbildung strebt schließlich langfristig Endzuständen zu, sogenannten Attraktoren, die keine stationären Gleichgewichtseigenschaften haben müssen, sondern dynamisches, rhythmisches oder auch arrhythmisch-chaotisches Verhalten zeigen können. Bei der dynamischen Strukturbildung in Wettbewerbssituationen kann es zur irreversiblen Verdrängung von Technologien in andere Wirtschaftsräume als neuem Endzustand kommen. In chemischen Reaktoren können chemische Reaktionen oszillierende Endzustände erreichen, in der Ökologie kennt man oszillierende Räuber-Beute-Beziehungen. Auch die langfristigen Klimaschwankungen oder Schwankungen von Virusinfektionen sind solche Attraktoren. All diese rhythmischen Prozesse können auch in Chaos umschlagen.

Aus diesen empirischen Erkenntnissen über die gemeinsamen Eigenschaften dynamischer Strukturbildung in ganz unterschiedlichen Systemen, die sich auch in ihrer Phänomenologie deutlich ausprägen, ergeben sich bereits einige wesentliche qualitative Schlussfolgerungen über ihre Ursprünge sowie für den Umgang mit ihnen und den mit ihnen verbundenen systemischen Risiken.

Dynamische Strukturen entstehen aus den inneren, kooperativen Eigenschaften ihrer Agenten unter dem Einfluss äußerer Triebkräfte. Kleine Eingriffe von außen oder Zufallsstörungen im Inneren können aufgrund der inhärenten Sensibilität der Systeme unvorhergesehen große und unbegrenzte Wirkungen hervorbringen. Eine fundamentale Botschaft ist also die der Unsicherheit und Empfindlichkeit. In der Nähe kritischer Zustände können in ihnen plötzliche Umbrüche ausgelöst werden, durch Selbstorganisation neue Ordnungszustände, erwünscht oder gefürchtet, aber auch Chaos entstehen. Es ist also bedeutsam, die Annäherung an instabile Zustände zu erkennen, d. h., die Geschichte des Systems zu berücksichtigen. Da in solchen Systemen stets gleichzeitige Prozesse in unterschiedlichen Zeitskalen ablaufen, kommt es darauf an, sie auf der Zeitachse im Detail und mit Geduld zu verfolgen. Das bedeutet bezogen auf globale systemische Risiken nichts Anderes, als dass die Staatengemeinschaft eine große Anzahl von Experten in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik bereithalten muss, die kritische Entwicklungen frühzeitig erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen entwickeln.

Prozesse der dynamischen Strukturbildung streben Endzuständen zu, die prinzipiell nicht im Detail prognostizierbar, aber doch durch Szenarienstudien erfassbar sind. Sie können neue Gleichgewichte, aber auch rhythmische oder chaotische Strukturen darstellen. Im Rahmen einer Governance systemischer Risiken bedürfen diese Attraktoren der besonderen Beachtung, um langfristige Risiken zu erkennen und ggf. rationale Anpassungsmaßnahmen zu ergreifen. Beispiele für Anpassungsmaßnahmen sind der vorbeugende Küstenschutz zur Verhinderung von Katastrophen im Rahmen des Klimawandels, die Aufgabe nicht mehr konkurrenz- oder auch konsensfähiger Technologien zur rechtzeitigen Einleitung eines notwendigen Strukturwandels in der Wirtschaft oder auch der gezielte Ausbau der Verkehrsinfrastruktur zur Vermeidung eines wirtschaftlich bedrohlichen Verkehrsinfarkts.

5. Modellsysteme

Die betrachteten Gemeinsamkeiten bei der dynamischen Strukturbildung in sehr unterschiedlichen Systemen aus Natur, Technik und Gesellschaft sind offensichtlich. Es stellt sich daher die Frage nach den Ursachen für diese Analogien. Sie bilden die Basis für das Verständnis der Strukturbildungsprozesse und damit ihrer Analyse. Die meisten dynamischen Strukturen in Natur, Technik und Gesellschaft sind flüchtig und nicht gezielt reproduzierbar. Sie eignen sich daher nicht als Ausgangspunkt eines systematischen Erkenntnisgewinns auf der Basis empirischer Beobachtung und theoretischer Durchdringung.

Grundsätzliche Erkenntnisse gewinnt man hingegen durch die Betrachtung vergleichsweise einfacher Modellsysteme. Dabei handelt es sich um solche, deren Strukturen auf der Grundlage etablierter Naturgesetze entstehen und experimentell reproduzierbar sind. Die mit ihnen verbundenen Erscheinungen können von beliebigen Beobachtern an beliebigen Orten und zu beliebigen Zeiten gezielt geschaffen und analysiert werden. Sie sind identisch und dokumentierbar, wenn sie unter denselben Bedingungen entstehen. Damit sind sie verbindlich, über jeden Verdacht der Beliebigkeit erhaben und somit einfache Prototypen für dynamische Strukturbildungen in wesentlich komplizierteren Systemen mit wesentlich komplizierteren elementaren Bestandteilen. Im Kontext systemischer Risiken interessieren wir uns für sie nicht um ihrer selbst willen, sondern weil sie aufgrund ihrer naturwissenschaftlich klaren Basis geeignet sind, grundsätzliche und verallgemeinerbare Einblicke in die makroskopischen Gesetze und die auf der Mikroebene ablaufenden Prozesse bei der dynamischen Strukturbildung zu gewähren.

5.1 Strömungsmuster

Während die Wolken- und Windstrukturen der Atmosphäre sowie Wirbel und Strudel in Flüssen, Seen und Meeren ubiquitär beobachtbar sind, ist ihre Vielfalt dennoch so groß und ihre Reproduzier- bzw. Kontrollierbarkeit dennoch so gering, dass sie sich einer systematischen empirischen Analyse entziehen. Demgegenüber lassen sich im Labor unter kontrollierbaren Bedingungen ähnliche Muster erzeugen, dabei aber im Detail kontrollieren und beobachten.

Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Bénard-Konvektion (Bénard 1900). Erwärmt man eine Flüssigkeit in einer Schale von unten, z. B. Öl in einer langen und rechteckigen Bratpfanne, so laufen mit der Zeit nacheinander und reproduzierbar unterschiedliche Prozesse ab. Zunächst ist der Temperaturunterschied zwischen unten und oben nur gering, die Flüssigkeit bleibt makroskopisch unverändert. Die von unten zugeführte Wärme wird durch den molekularen Transportmechanismus der Wärmeleitung durch das System transportiert – ein Vorgang, der makroskopisch nicht sichtbar ist. Bei weiterer Temperaturerhöhung passiert dann etwas Überraschendes: Die Flüssigkeit setzt sich bei einer bestimmten Temperaturdifferenz plötzlich makroskopisch in Bewegung, und zwar wohlgeordnet in Form von Rollen. Sie steigt in Längsstreifen parallel zur Begrenzung der Schale und entgegengesetzt zur Richtung der Schwerkraft an der einen Grenze der Rolle auf, kühlt sich an der Oberfläche ab und sinkt an der anderen Grenze der Rolle wieder herab. Das Bemerkenswerte ist, dass sich die Flüssigkeitsmoleküle über im Vergleich zu ihrer Größe riesige Entfernungen kollektiv verständigen und ordnen müssen, um eine solche makroskopische Bewegung zu erzeugen. Wir können das Experiment beliebig oft wiederholen, stets mit demselben grundsätzlichen Ergebnis, allerdings mit Ausnahme eines Details: Die Rollen bilden sich immer wieder in unterschiedlichen Drehrichtungen aus. Mal drehen sie links herum, mal rechts. Beide Rollrichtungen sind vollkommen gleichberechtigt. Welche sich in einem bestimmten Experiment ausbildet und dann stabil bleibt, hängt von zufälligen Anfangsfluktuationen ab. Da die beiden Umlaufrichtungen gleichwertig sind, das System in Bezug darauf also symmetrisch

ist, bedeutet die tatsächliche Wahl bei einer experimentellen Realisierung daher einen Symmetriebruch. Damit geht eine Pfadabhängigkeit, d. h. eine Historizität der dynamischen Entwicklung einher, denn alle weiteren Entwicklungen bei Veränderungen der äußeren Bedingungen gehen von der einmal gewählten Drehrichtung aus. Die Strukturbildung hängt sensibel von der angelegten Temperaturdifferenz ab. Wird diese bis unter den kritischen Wert verringert, bricht die Bénard-Konvektion zusammen. Wird sie erhöht, durchläuft das System weitere Strukturbrüche, durch die sich neue, teilweise sehr komplexe Strömungsmuster herausbilden. Bei immer weiterer Erhöhung der Temperaturdifferenz zwischen unten und oben kommt es schließlich zur Zerstörung der geordneten Struktur und zum Übergang zu makroskopisch ungeordneter, chaotischer Turbulenz.

Die Muster der Bénard-Konvektion sind nicht auf Gas-/Flüssigkeitssysteme beschränkt. Man kann sie z. B. auch aus Sand auf einer vibrierenden Platte erzeugen oder sie in vielfältigen Formen in der Natur beobachten, z. B. als tote Muster einer Gezeitenströmung im Watt, als Muster von Salzablagerungen am Boden von ausgetrockneten Seen oder als Staubmuster auf erhitzten Steinen – insgesamt also als Rückstände abgelaufener dynamischer Strukturbildungen.



Bénard-Zellen auf
ausgetrocknetem Boden

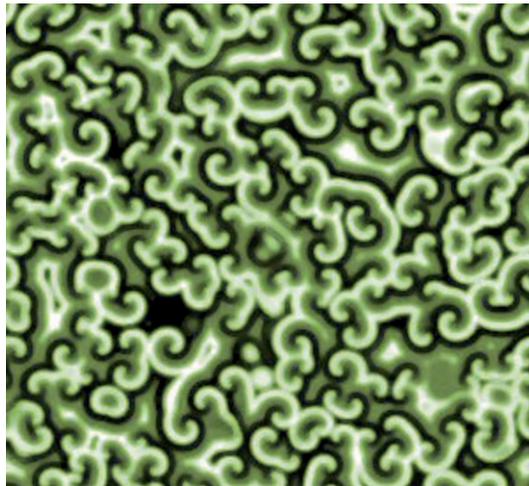
© iStock/mycola

5.2 Chemische Muster

Die Farbmuster in der Natur sind überaus vielfältig und geben im Hinblick auf ihre detaillierten Entstehungsprinzipien immer wieder Rätsel auf – man denke z. B. an die Musterung von Tierfellen oder Blütenblättern. In der Natur entstehen sie unter nicht reproduzierbaren und nicht kontrollierbaren Bedingungen und lassen sich daher nicht durch empirische Beobachtung systematisch in Bezug auf ihre Dynamik analysieren. Aber auch hier können Laborversuche unter reproduzierbaren Bedingungen die beobachteten Phänomene einer Analyse zuführen.

Bei chemischen Reaktionen entstehen neue Stoffe mit neuen Eigenschaften, z. B. neuen Farben. Diese neuen Eigenschaften sind üblicherweise gleichmäßig im System verteilt. So kann durch die Reaktion zweier farbloser Flüssigkeiten durchaus eine einheitlich gefärbte Flüssigkeit entstehen. Es gibt aber auch Reaktionen, bei denen aus einer einheitlich gefärbten Flüssigkeit bei einem kritischen Wert von zugeführten Reaktanten plötzlich makroskopische Muster über Zeit und Raum entstehen, die in ihrer Dimension wie bei den Strömungsmustern milliardenfach größer sind als die Dimensionen der beteiligten Moleküle selbst.

Das bekannteste Beispiel ist die Belousov-Shabotinsky-Reaktion (Belousov 1959). Dabei handelt es sich um eine sogenannte autokatalytische Reaktion, an der Stoffe beteiligt sind, die sich selbst katalysieren. Das bedeutet nichts anderes, als dass sich derartige Moleküle gewissermaßen selbst vermehren können. Es gelingt ihnen, andere Moleküle so umzuwandeln und zusammensetzen, dass Moleküle ihrer eigenen Art entstehen. Bei der Belousov-Shabotinsky-Reaktion werden spezielle Substanzen ein- und die Folgeprodukte abgeführt. Ab einer bestimmten kritischen Durchflussrate kommt es zu einer Initialreaktion mit einer räumlichen Symmetriebrechung. Die räumlich homogene Verteilung der Reaktionsprodukte wird zerstört und macht chemischen Mustern Platz. Ein einmal entstandenes Muster wird verstärkt und dauerhaft stabilisiert. Unter geeigneten Versuchsbedingungen ergeben sich stationäre Muster, die denen von Tierfellen sehr ähnlich sind. Auch Reaktionen mit ständigem rhythmischen Farbumschlag können aufrechterhalten werden. Durch die unterschiedliche Reihenfolge der Prozessbedingungen können unterschiedliche Muster erzeugt werden und damit die Pfadabhängigkeit bzw. Historizität der Dynamik zum Ausdruck kommen. Fällt die Durchflussrate unter den kritischen Wert, bricht die Struktur zusammen. Wird sie zunehmend erhöht, kommt es zur Ausbildung ungeordneter flüchtiger Strukturen, die schließlich in Chaos münden.



Belousov-Shabotinsky-Muster

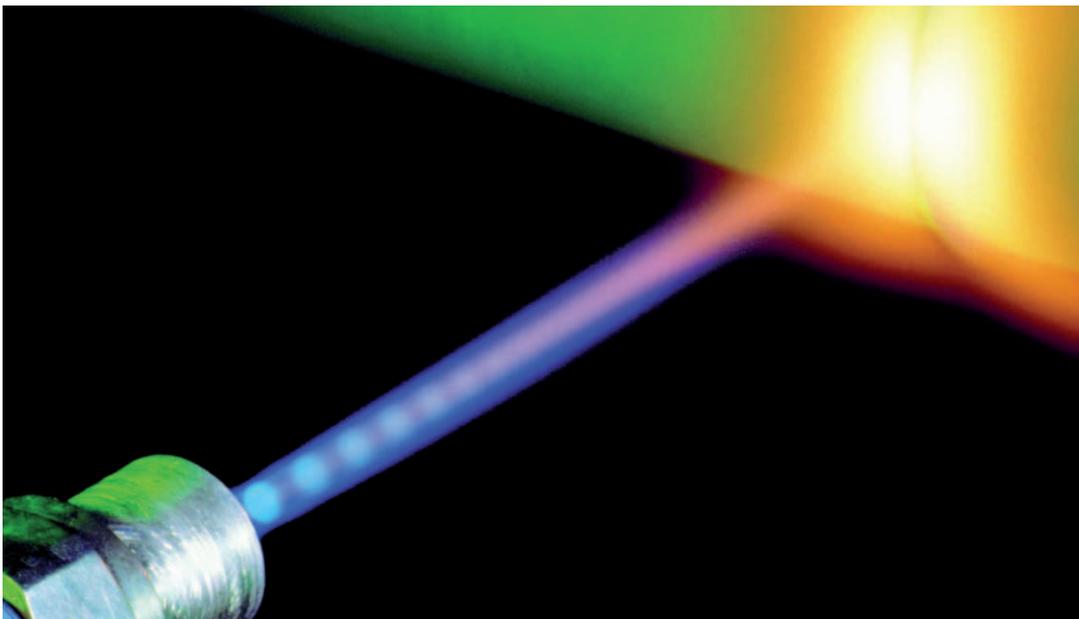
© Chiswick Chap,
via Wikimedia Commons

5.3 Laserlicht

In einer Gasentladungsröhre, z. B. einer gewöhnlichen Neonröhre, entsteht Licht durch atomare Prozesse, bei denen Elektronen unter Energiezufuhr ihre energetischen Zustände ändern. Ein einzelnes Gasatom besteht aus einem positiv geladenen Kern und einer Reihe von negativ geladenen Elektronen, die auf unterschiedlichen Bahnen um den Atomkern kreisen. Ein einzelnes Elektron kann nur ganz spezifische Umlaufbahnen einnehmen, andere sind ihm verwehrt. Den unterschiedlichen Umlaufbahnen sind unterschiedliche Energieniveaus zugeordnet. Normalerweise läuft ein Elektron auf seiner tiefsten Bahn, also der mit der niedrigsten Energie. Fließt nun ein elektrischer Strom, der von vielen frei herumschwirrenden Elektronen getragen wird, durch die Röhre, so stoßen diese mit den einzelnen Gasatomen zusammen. Trifft ein Stromelektron auf ein Elektron des Gases, so wird dieses auf eine Umlaufbahn mit höherer Energie gehoben. Von dieser kann es ganz plötzlich zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt wieder auf seine Umlaufbahn niedriger Energie zurückspringen. Die dabei frei werdende Energie gibt es als Lichtwelle ab.

In einer gewöhnlichen Neonlampe läuft dieser Prozess in großer Vielfalt und ungeordnet ab. Die zahlreichen unterschiedlichen Lichtwellen überlagern sich zu einem Lichtfeld aus vielen Wellenlängen und Frequenzen, die zusammen die Leuchterscheinung der Lampe bewirken.

In einem Laser (Haken 1986) wird die gewöhnliche Gasentladungslampe an beiden Enden mit Spiegeln versehen. Die Lichtwellen, die längs der Röhrenachsen verlaufen, verbleiben dann längere Zeit, im idealen Grenzfall für immer in der Röhre. Praktisch wird einer der Spiegel etwas durchlässig gestaltet, sodass etwas von dem Licht als Produkt nach außen gelangen kann. Durch die Spiegel werden diejenigen Wellenlängen selektiert, die gerade aufgrund ihrer Wellenlänge in die Röhre passen. Dabei zeigt sich nun, dass das System offenbar eine Eigendynamik besitzt, in der Art, dass von den immer noch vorhandenen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen und Amplituden schließlich eine einzige mehr als alle anderen verstärkt wird und schließlich allein in der Röhre übrig bleibt: das monochromatische Laserlicht.



Laserstrahl

© EjuPod,
via Wikimedia Commons

Man hat beobachtet, dass der Umschlag von dem ursprünglich entstehenden Mischlicht zum geordneten Laserlicht plötzlich erfolgt, wenn die Elektronen der Gasatome in genügend schneller Folge angeregt werden. Dies geschieht bei einer kritischen zugeführten Stromstärke, bei der sich der Ordnungszustand des Lichts im Laser dramatisch ändert, auch wenn wir die Stromstärke nur ein ganz klein wenig verändern. Wird die zugeführte Stromstärke unter den kritischen Wert abgesenkt, bricht die monochromatische Lichtwelle zugunsten des gewöhnlichen Mischlichts zusammen. Bei immer weiter zunehmender Stromstärke über den kritischen Wert hinaus kommt es zunächst zu neuen pulsierenden Lichtstrukturen und schließlich zu einem Umschlag ins Chaos.

6. Erkenntnisse

Die empirisch beobachteten Strukturbildungsprozesse in den Modellsystemen lassen sich unter Anwendung naturwissenschaftlicher und mathematischer Methoden theoretisch durchdringen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bereits diese verhältnismäßig einfachen Systeme sämtliche gemeinsamen Merkmale dynamischer Strukturbildung enthalten. Sie eignen sich daher dazu, allgemeingültige Erkenntnisse zu gewinnen. Offensichtlich ergeben sich die makroskopischen Strukturen aus Wechselwirkungen zwischen den elementaren Agenten, sodass sich für eine theoretische Analyse eine getrennte Betrachtung der unterschiedlichen Ebenen, der Makro- und Mikroebene, anbietet.

6.1 Makroebene

Eine allgemeine Theorie des makroskopischen Systemverhaltens stellt die Thermodynamik bereit. Thermodynamische Prinzipien auf Makroebene erklären, dass ein thermodynamisches System in Nichtgleichgewichtssituationen, also unter dem Einfluss äußerer Einwirkungen, zwei Verhaltensregime mit gänzlich unterschiedlichen Eigenschaften annehmen kann (Prigogine 1979).

Wenn die äußeren Einwirkungen mäßig sind, z. B. bei geringer Temperaturdifferenz zwischen der Heizplatte und der Umgebung im Modellsystem der Bénard-Konvektion, befindet sich das System in einem linearen, „friedlichen“ Regime. Die durch die äußeren Einwirkungen ausgelösten Reaktionen des Systems hängen dann linear und kausal von den Einwirkungen ab. Die entstehenden Strukturen ergeben sich in vorhersagbarer Weise aus dem Extremwert eines thermodynamischen Potentials. In der zeitlichen Evolution erreichen sie einen stationären Zustand in Form eines vorhersagbaren, stabilen Attraktors, z. B. der stationären Wärmeleitung in einer Flüssigkeit unter dem Einfluss einer Temperaturdifferenz. In solchen stationären Zuständen haben allgegenwärtige Fluktuationen, wenngleich sie das System momentan stören, nicht die Kraft, einen neuen Systemzustand hervorzurufen. Vielmehr folgt ihnen eine Rückstellkraft, die das System sofort wieder in den stationären Ausgangszustand zurückführt.

Wenn nun die äußeren Einwirkungen vergrößert werden, z. B. durch eine Erhöhung der Temperaturdifferenz im Modellsystem der Bénard-Konvektion, erreicht das System schließlich ein nichtlineares Regime, in dem Ursachen und Wirkungen nicht mehr einfach linear korreliert sind. Die thermodynamische Theorie zeigt, dass dann kein thermodynamisches Potenzial mehr existiert. Der Zustand des „friedlichen“, linearen Regimes kann also bei einer Erhöhung der äußeren Einwirkungen instabil werden und plötzlich in einen neuen geordneten Zustand bzw. im Sinn von Bifurkationen in mehrere aufeinanderfolgende Zustände umschlagen, wobei das System seine eigene dynamische Geschichte erzeugt. Diese Strukturbildung ähnelt einem Phasenübergang in Gleichgewichtssystemen, wie er beim Verdampfen und Kondensieren, beim Kristallisieren oder auch bei der Magnetisierung beobachtet wird. Man spricht daher auch bei der dynamischen Strukturbildung in offenen Systemen von einem Phasenübergang. Im kritischen Bereich solcher Gleichgewichtsphasenübergänge nehmen die Fluktuationen stark zu. Es bilden sich Molekülcluster mit Korrelationen von langer Reichweite und häufigen Umschlägen zwischen den verschiedenen Phasen. Unterschiedliche Annäherungen an das kritische Gebiet führen zu Hysterese-Effekten mit unterschiedlichem Verhalten der Systeme im Sinn von Pfadabhängigkeit bzw. Historizität. Das Verhalten des Systems ist durch einfache Potenzgesetze charakterisiert, deren Exponenten universelle Eigenschaften haben. Ein ganz ähnliches Systemverhalten, also die starke Zunahme von Fluktuationen und Universalität, fordert die thermodynamische Theorie auch bei den Nichtgleichgewichtsphasenübergängen der Modellsysteme. Die Instabilitäten hängen dort zwar von der Größe der äußeren Einwirkungen, nicht aber von den inneren Details der Systemzustände und den daraus folgenden Fluktuationen ab – ein Hinweis auf Dekomplexifizierung und

Universalität. Da im nichtlinearen Bereich kein thermodynamisches Potenzial existiert, gibt es keine Möglichkeit, den neuen Zustand vorherzusagen. Der Kollaps des „friedlichen“ Zustands wird durch zufällige Fluktuationen getriggert, doch die tieferen Ursachen liegen in der Tatsache, dass das System in seiner Vorgeschichte einen instabilen Bereich erreicht hat. Daher sind Versuche, einen lokalen und momentanen Grund für den Kollaps zu finden, grundsätzlich zum Scheitern verurteilt. Der Kollaps hat einen fundamental endogenen, in der Geschichte des Systems begründeten Ursprung, wohingegen Fluktuationen und auch exogene Einwirkungen, selbst wenn sie Schockcharakter haben, lediglich die Rolle von Triggerfaktoren einnehmen.

Es ist hervorzuheben, dass die thermodynamischen Gesetze nur für thermodynamische Systeme, dann aber allgemein gelten und insbesondere nicht von der Natur der Wechselwirkungen abhängen. Beim Bénard-Problem in Gasen und Flüssigkeiten z. B. sind die Wechselwirkungen vom schwachen, von einer kurzen Reichweite geprägten Van-der-Waals-Typ. Bei der chemischen Musterbildung herrschen grundsätzlich andere, viel stärkere chemische Wechselwirkungen. Interessanterweise lassen sich Bénard-Muster auch in Sand auf einer vibrierenden Platte erzeugen, also in einem nicht thermodynamischen System mit ganz anderen Wechselwirkungen. Schließlich wirken bei der Entstehung von Laserlicht, also wiederum einem nicht thermodynamischen System, Photonen mit den Dipolen des Lasermediums zusammen. Auch in Systemen, in denen die thermodynamischen Funktionen und Gleichungen formal nicht anwendbar sind, gelten somit offensichtlich thermodynamische Prinzipien, z. B. die Entstehung neuer Ordnungsstrukturen in Systemen fern vom Gleichgewicht, wenn die exogenen Einwirkungen ein kritisches Maß übersteigen. Dabei hat diese Strukturbildung, wenn auch durch zufällige Fluktuationen ausgelöst und im Hinblick auf Zeitpunkt und detaillierte Ausprägung im Detail nicht vorhersagbar, endogene, historische Ursachen mit erkennbarer Annäherung an instabile Bereiche, worauf insbesondere im Zusammenhang mit Börsencrashes kürzlich erneut hingewiesen wurde (Sornette 2003). Angesichts dieser Universalität ist zu erwarten, dass die Erkenntnisse aus der thermodynamischen Analyse im Sinn von thermodynamischen Prinzipien für grundsätzliche Aussagen zu den Phänomenen der dynamischen Strukturbildung eine über die betrachteten Modellsysteme hinaus ausstrahlende Gültigkeit haben.

6.2 Mikroebene

Die Erkenntnisse aus der thermodynamischen Theorie für die Makroebene werden bestätigt und ergänzt, wenn man die Prozesse auf der Mikroebene betrachtet. Ein Blick auf die elementaren Vorgänge der Modellprozesse zeigt, dass dort darwinsche Prozesse am Werk sind, welche die Strukturbildung im Detail hervorbringen (Haken/Wunderlich 1991). Die neu entstehenden Ordnungszustände haben ihren Ursprung in den speziellen Eigenschaften und Wechselwirkungen der elementaren Agenten. Wenn durch äußere Einwirkung eine kritische Instabilitätsregion erreicht ist, beginnt das System, durch großräumige Fluktuationen neue Moden makroskopischen Verhaltens zu testen. Solche Moden, über die ein System in großer Anzahl verfügt, sind seine grundsätzlich möglichen makroskopischen Verhaltensvarianten, z. B. unterschiedliche Lichtwellen, Stromlinien oder chemische Muster. Die nichtlinearen elementaren Wechselwirkungsprozesse laufen auf unterschiedlichen Zeitskalen ab. Schnelle Prozesse erreichen ihre Gleichgewichtswerte auf Zeitskalen, auf denen sich die langsameren entwickeln, und werden daher von diesen in Bezug auf ihre Dynamik dominiert. Ein darwinscher Wettbewerb zwischen den vielfältigen elementaren Wechselwirkungen führt so zu einer Auslese, mit dem Ergebnis, dass nur wenige Moden wirksam werden und die Entstehung makroskopischer Ordnungen, die durch wenige Ordnungsvariablen beschrieben werden können, begründen. Jene wenigen dominanten Moden generieren in einem Bottom-up-Effekt ein kollektives Feld von Mustern, das auf die elementaren Aktionen der Agenten zurückwirkt. So steuert im Laser das monochromatische Lichtfeld durch Wechselwirkung mit dem Lasermaterial die elementaren Schwingungsprozesse seiner Dipole und zwingt sie in die Dynamik des Feldes. Beim Bénard-Problem wächst die zuerst angeregte Strömungsform exponentiell an und zwingt alle anderen potenziellen Strömungsmoden, ihr zu folgen. Man spricht von einer Zirkelkausalität zwischen Mikro- und Makroebene. Sie führt zu komplexen Rückkopplungsschleifen und zu einem gänzlich neuen Systemverhalten, das nicht aus seinen ele-

mentaren Bestandteilen abgeleitet werden kann. Als Konsequenz dieser Reduktion an Komplexität kann ein Phasenübergang des Systems in solchen Zustandsbereichen durch kritische Werte einfacher makroskopischer Parameter beschrieben werden, beispielsweise einer kritischen Inversion im Laser, einer kritischen Temperaturdifferenz bei der Bénard-Konvektion oder einer kritischen Konzentration eines oder mehrerer Reaktanten bei der Ausbildung chemischer Muster. Als Folge der darwinschen Ausleseprozesse auf der Mikroebene ergeben sich schließlich unterschiedliche Zeitmaßstäbe auf der Makroebene. Das System entwickelt sich unter einer ansteigenden äußeren Einwirkung zunächst langsam, nimmt dann aber plötzlich einen neuen Zustand ein, sobald ein kritischer Wert der Einwirkung überschritten wird.

Auch die darwinschen Prozesse auf der Mikroebene, insbesondere die Reduktion der Komplexität durch die elementaren Auswahlprozesse, können offensichtlich für die betrachteten Modellsysteme eine allgemeine Gültigkeit beanspruchen. Da auch sie nicht von der speziellen Natur von Wechselwirkungen abhängen, liegt es nahe, ihnen eine darüber hinausgehende allgemeine Relevanz zuzuordnen.

7. Interdisziplinäre Ausstrahlung: Potenziale und Grenzen

Die aus der naturwissenschaftlich-mathematischen Analyse der Modellsysteme abgeleitete Universalität dynamischer Strukturbildungsgesetze auf makroskopischer wie auch mikroskopischer Ebene ist letztlich die Ursache für die beobachteten Analogien in den vielfältigen Systemen von Natur, Technik und Gesellschaft, die sonst keine Ähnlichkeiten aufweisen. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Analogien, ebenso wie die thermodynamischen und darwinschen Prinzipien, auf die grundsätzlichen Erscheinungen bei der dynamischen Strukturbildung beschränken. Detaillierte Erkenntnisse über die Ausprägung und Evolution der Strukturen erfordern die Berücksichtigung der Natur der beteiligten Agenten und ihrer Wechselwirkungen. Die empirisch identifizierten Gemeinsamkeiten bei den grundsätzlichen Erscheinungen der dynamischen Strukturbildung in komplexen Systemen legen die Vermutung nahe, dass es disziplinübergreifende Theorien, Modelle und Methoden geben sollte, die auch systemische Risiken beschreiben und zu geordneten qualitativen sowie quantitativen Erkenntnissen führen. Es stellt sich also die Frage nach der interdisziplinären Ausstrahlung, d. h. nach der Übertragbarkeit der mathematisch-naturwissenschaftlichen Erkenntnisse von den Modellprozessen auf die Prozesse in beliebigen Systemen von Natur, Technik und Gesellschaft (Lucas/Roosen 2010).

Die Agenten der Modellsysteme sind Elektronen, Photonen, Atome und Moleküle, deren individuelle Eigenschaften ebenso wie die Wechselwirkungskräfte, also die Kommunikation zwischen ihnen, durch quantenchemische Berechnungen ermittelt werden können wie die Wechselwirkungskräfte, also die Kommunikation zwischen ihnen. Es handelt sich um vergleichsweise einfache Agenten. Die Wechselwirkungen zwischen ihnen sind direkt und unmittelbar und führen zu wohl definierten Zustandsänderungen. Die für sie geltenden einschlägigen naturwissenschaftlichen Gesetze und ihre mathematischen Formulierungen sind bekannt und insbesondere invariant gegenüber einer Verände-

rung der Rahmenbedingungen. Identische Versuchsbedingungen bei den Modellsystemen führen zu identischen Ergebnissen, unabhängig von den Personen, die sie durchführen, vom Ort oder von der Zeit. Ihre Agenten haben weder einen Willen noch Intelligenz noch Ziele noch Wertvorstellungen. Die dynamischen Strukturen in diesen Systemen können im Detail analysiert und berechnet werden.

In den typischen Systemen von Natur, Technik und Gesellschaft, die für Untersuchungen im Bereich der systemischen Risikoforschung interessant sind, hat man es im Vergleich dazu mit wesentlich komplexeren Agenten zu tun. Sie besitzen eine Vielfalt von Eigenschaften, die keineswegs quantitativ vorgegeben sind und auch nicht universell gelten, sondern insbesondere von den Systembedingungen abhängen, in denen sie wirken.

Bereits biologische Systeme, die eine Zwischenstellung zwischen den physikochemischen und den sozioökonomischen einnehmen, entziehen sich einer Berechenbarkeit auf der Grundlage mathematisch formulierter und universell gültiger Naturgesetze. In diesem Sinn gibt es keinen „Newton des Grashalms“ (Kant 1786). Noch weiter entfernt von physikochemischen Systemen sind die soziobiologischen, z. B. die von Tierpopulationen, bei denen graduell ein zielgerichtetes Verhalten festzustellen ist. Auf der höchsten Stufe der Komplexität stehen die menschlichen Gesellschaften. Sozioökonomische Prozesse, die mit dem Verhalten von Menschen zu tun haben und die dynamischen Strukturbildungsprozesse in Nationen, Märkten, Kulturen und Gesellschaften beschreiben, hängen von Ort, Zeit und den beteiligten Personen und Organisationen als Agenten ab. Ihre Wechselwirkungen sind nicht nur direkt, sondern auch mittelbar, z. B., wenn Personen aufeinandertreffen, wobei sich Emotionen und Gedanken ergeben, die die Zustandsänderung der Agenten mit zeitlicher Verzögerung bewirken, und diese Zustandsänderungen auch von den Wechselwirkungen im Gesamtsystem über ein kollektives Feld, das durchaus nicht materieller Natur sein muss (Sheldrake 2015), abhängen.

Die Theorien und Modelle zu ihrer Beschreibung müssen dies reflektieren. In ihren Populationen treten neue Strukturbildungsmechanismen wie Verhaltensänderungen, Adaption durch Imitation und Lernen in Erscheinung. Gleichartige Prozesse werden in der Regel an unterschiedlichen Orten und Zeiten, also unter den jeweiligen unterschiedlichen gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, unterschiedlich ablaufen. Insbesondere müssen die spezifischen Kontexte, Beschreibungsebenen und Begriffe für ein zu untersuchendes Phänomen einfließen. Dies stellt besondere Anforderungen an das empirische Wissen und die zugehörige Modellbildung. Die empirische Verifikation von Modellen für sozioökonomische Systeme ist zudem im Gegensatz zu den physikochemischen Systemen inhärent methodisch eingeschränkt.

Aufgrund dieser sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Agenten und ihrer Wechselwirkungen ist bei einer Übertragung von Modellen, die durch physikalisch-chemische oder ganz allgemein naturwissenschaftliche Ansätze entwickelt wurden, auf Systeme und Phänomene ganz anderer Art auf Grenzen zu achten. Eine Reduzierung etwa einer biologischen oder gar sozioökonomischen Strukturbildung auf physikalische Naturgesetze jenseits der grundsätzlichen Phänomene, wie sie gelegentlich angestrebt wurde, wurde vielfach falsifiziert.

Trotz dieser Grenzen oder sogar gerade wegen der damit adressierten Komplikationen ist die Übertragung mathematisch-naturwissenschaftlicher Theorien und Modelle auch auf komplexere Systeme als die physikochemischen ein wesentliches Hilfsmittel, um Einblicke in die Mechanismen ihrer dynamischen Strukturbildung zu gewinnen. Sie geben Hinweise auf eine fundierte Modellbildung, qualitativ wie auch quantitativ, und erleichtern das Ordnen des empirischen Materials im Hinblick auf wesentliche und unwesentliche Prozesse.

Die niedrigste Ebene der Übertragung, die Metapher, zeichnet sich durch eine nur oberflächliche Ähnlichkeit zwischen einem naturwissenschaftlich fundierten theoretischen Analysemodell und dem betrachteten Untersuchungsphänomen aus. Durch die Übertragung soll ein neuer Kontext konstruiert werden, in dem das betrachtete Phänomen in einem neuen Licht erscheint und dadurch bisher unbeachtete Gedanken- und Forschungshorizonte über das Phänomen eröffnet werden. Insbesondere kann

eine dem betrachteten Phänomen angepasste theoretische Modellbildung durch eine metaphorische Betrachtung stimuliert werden.

Die nächsthöhere Ebene der Übertragung, die Analogie, adressiert abstrahierte Ähnlichkeiten ausgewählter Aspekte zwischen dem theoretischen Analysemodell und dem betrachteten Phänomen. Mit Analogien wird die Absicht verfolgt, ein betrachtetes Phänomen besser zu erfassen und zu erklären, bestimmte Handlungsempfehlungen abzuleiten oder für neue Problemlösungen zu sensibilisieren. Ein Beispiel aus den Gesellschaftswissenschaften ist die Analogie zwischen den Phänomenen der aktuellen Flüchtlingskrise und den aus dem Studium der Modellsysteme folgenden gemeinsamen Eigenschaften der dynamischen Strukturbildung (Lucas 2016). Auch in vielen anderen Fällen liefern Analogiebetrachtungen wertvolle Hinweise, zum Beispiel auf die Annäherung an kritische Zustände, ihre Erfassung durch einschlägige Parameter, auf Risiken und ihre Beherrschung.

Auf der höchsten Ebene der Übertragung, der Isomorphie, können die Gesetzmäßigkeiten für ein System als interdisziplinär gültige Regeln auf ein anderes übertragen werden. Dabei sind seine spezifischen Bedingungen zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass sich die übertragenen Gesetzmäßigkeiten als zutreffend erweisen. Beispiele für gelungene isomorphe Übertragungen innerhalb der Modellsysteme sind z. B. die Anwendungen der bei der Analyse der dynamischen Strukturbildung im Laser gefundenen Modelle auf Phänomene in Flüssigkeiten, z. B. die Bénard-Konvektion oder die Musterbildung in chemischen Reaktionen. Hier wurde die systemdynamische Rahmentheorie durch die jeweils anwendbaren Spezialtheorien wie die Hydrodynamik, die irreversible Thermodynamik und die Reaktionskinetik ergänzt, was dann, wie beim Laser, zu quantitativen Aussagen über die Strukturbrüche, insbesondere die kritischen Zustände, aber auch über die Details der möglichen Strukturformen führte.

Keine Isomorphie besteht hingegen bei der Übertragung von Gesetzmäßigkeiten der dynamischen Strukturbildung in den Modellsystemen auf beliebige Systeme und die in ihnen zu betrachtenden systemischen Risiken, wenn Bezug auf die speziellen Wirkungsgesetze genommen wird. Wohl aber gilt, dass die fundamentalen Prinzipien der Emergenz und Evolution dynamischer Strukturen in allen Systemen gleich sind, insbesondere auch dieselben wie in den einfachen Modellsystemen. Wenngleich universell, so müssen diese Prinzipien doch generalisiert und auf das jeweils zu betrachtende System zugeschnitten werden. Dies bedeutet bei der Entwicklung einer allgemeinen Rahmentheorie zur Analyse systemischer Risiken eine Abkehr von den deterministischen Gesetzen von Physik und Chemie zugunsten von qualitativ-probabilistischen Ansätzen auf der Mikroebene. Die mathematischen Werkzeuge sind demgegenüber universell, d. h. dieselben für die Modellsysteme einerseits sowie die Analyse systemischer Risiken in beliebigen Systemen andererseits.

Alle Formen der Übertragung sind hilfreich, denn sie haben das Potenzial, die Modellbildung und Analyse für ein zu untersuchendes Phänomen zu befördern. Sie lenken den Blick auf Eigenschaften, die ohne Bezug zu den mathematisch-naturwissenschaftlich fundierten Erkenntnissen leicht übersehen werden. Bereits im ersten Stadium der Modellentwicklung führen sie zu der Notwendigkeit einer klaren Definition von Begriffen sowie einer Konzentration auf die wesentlichen internen Beziehungen, Einflussgrößen und Wirkmechanismen.

Offensichtlich lassen sich die naturwissenschaftlich gewonnenen Erkenntnisse nur um den Preis von Abstraktion auf andere Disziplinen bis hin zu den Sozialwissenschaften übertragen. Aber auch in dieser Abstraktion gilt, dass die Emergenz kollektiver Ordnung durch die Dynamik elementarer Agenten unter nichtlinearen Wechselwirkungen entsteht, entsteht, wobei sich Makro- und Mikroebene durch Zirkelkausalitäten gegenseitig beeinflussen. Unterschiedliche Zeitmaßstäbe, Zufälligkeiten und Unvorhersagbarkeit sind allgemeingültige Erkenntnisse der thermodynamischen und darwinschen Prinzipien. Sie gelten unabhängig vom System, also davon, ob die Agenten Moleküle, Organismen, Tiere, Menschen oder Organisationen sind.

Auch die Dekomplexifizierung in der Nähe kritischer Bereiche ist offensichtlich ein allgemeingültiges Resultat. Im Ergebnis bedeutet dies, dass sich die Annäherung an solche Instabilitätspunkte oft vergleichsweise einfach erkennen lässt. Im Fall technischer Strömungsprozesse z. B. muss man nicht alle Einzelheiten der Bewegung der Moleküle kennen, um einen drohenden Umschlag einer geordneten laminaren Strömung in ungeordnete Turbulenz vorauszusagen. Es genügt ein ganz bestimmter Parameter, die sogenannte Reynoldszahl, als spezielle Kombination von Geschwindigkeit, Viskosität und Rohrdurchmesser. Jeder Ingenieur weiß und beachtet das. Im Verkehr muss man nicht das tatsächliche Mikroverhalten jedes einzelnen Autofahrers kennen, um für bestimmte Verkehrssituationen ein Makroverhalten wie Stop-and-go-Wellen oder einen Verkehrsinfarkt voraussagen zu können. Intelligente Verkehrsleitsysteme erkennen solche Trends rechtzeitig anhand von Dichtemustern und steuern bei einem kritischen Wert den Verkehrsfluss entsprechend – ein zumindest im Prinzip längst gelöstes Problem. Im Klimasystem muss man keineswegs die genaue Klimaentwicklung in allen Details verstehen, sondern das Monitoring der globalen Temperaturentwicklung und ihrer Korrelation mit dem Anstieg der Klimagase sowie die Kenntnis eines kritischen Werts reichen aus, um ein drohendes Umkippen des Klimas mit unübersehbaren Folgen zu erkennen. Ähnliches gilt für die Frühdiagnose von entstehenden Krankheiten mithilfe von groben, anhand des Blutbilds gewonnenen Markern. Solche Informationen bis hin zu durch Zahlen belegten Instabilitätskriterien aus einer Zeitreihenanalyse hat man, zumindest nachträglich, oft auch in gesellschaftlichen Umbruchprozessen gefunden.

8. Mathematische Formulierungen

Qualitative Modelle für die dynamische Strukturbildung in den Systemen von Natur, Technik und Gesellschaft, die von den naturwissenschaftlichen Erkenntnissen inspiriert sind, haben das Potenzial, empirisches Wissen zu ordnen, zu vernetzen und auf diese Weise in höherem Maß fruchtbar zu machen, als es ohne diese Leitlinien möglich wäre. Sie repräsentieren daher einen erheblichen Mehrwert gegenüber rein empirischen Analysen.

Zu einem detaillierteren Einblick in die Strukturbildung gelangt man aber insbesondere bei der Aufstellung und Auswertung quantitativer mathematischer Formulierungen. Die im Zuge der Betrachtung der Modellsysteme gewonnenen Einblicke in die Beziehungen zwischen den elementaren nichtlinearen Prozessen auf der Mikroebene der Agenten und den makroskopischen Strukturbildungen bilden die Basis der mathematischen Formulierungen. So sind unterschiedliche Zeitskalen sowie der stochastische Charakter der Mikroprozesse inklusive ihrer Konsequenz für die Definition von Ordnungsparametern ebenso abzubilden wie die Existenz von Fluktuationen und die zirkulare Kausalität bei Rückkopplungen zwischen den Aktionen auf der Mikroebene und dem durch sie geschaffenen kollektiven Feld. Die mathematische Formulierung findet auf einer Ebene statt, die von jedwedem speziellen naturwissenschaftlichen Kontext losgelöst ist. Entscheidend ist, dass das empirische Wissen über das zu untersuchende System, geordnet nach den aus den Modellsystemen folgenden Erkenntnissen, Ausgangspunkt der Analyse ist.

Eine quantitative Modellierung der dynamischen Strukturbildung in komplexen Systemen, ob in Physik, Chemie, Biologie, Technik, Ökonomie, Finanzwirtschaft oder auch den Gesellschaftswissenschaften, entsteht daher aus einer Kombination von Informationen über das empirische Systemverhalten mit naturwissenschaftlich basierten Erkenntnissen bezüglich ihrer universellen Eigenschaften und der Mathematik als Metatheorie. Jeder Erstellung eines quantitativen Modells muss eine qualitative Charakterisierung des Systems vorausgehen. Qualitative und quantitative Modelle sind zueinander komplementär und eine Feedback-Schleife zwischen qualitativen und quantitativen Ansätzen ist notwendig.

Die mathematischen Formulierungen gehen von der Mikrodynamik der Agenten aus. Solche agentenbasierten Ansätze sind methodisch grundsätzlich interdisziplinär und daher auf alle Systeme anwendbar, bei denen die Wechselwirkungen zwischen den elementaren Agenten sinnvoll modelliert werden können. Sie werden stets dann eingesetzt, wenn die Verbindung zwischen der Mikro- und der Makroebene explizit modelliert werden soll. Im Gegensatz zu den Modellsystemen sind nun allerdings keine einfachen und universellen, d. h. vom Systemzustand unabhängigen Wechselwirkungsgesetze zur Modellierung der elementaren Dynamik bekannt. Den am System beteiligten Agenten müssen aus empirischen Erkenntnissen gewonnene quantitative Eigenschaften und Regeln ihres Verhaltens zugeordnet werden. Sie können Handlungen ausführen, ihre Umgebung wahrnehmen und verändern sowie auf Veränderungen der Umwelt reagieren. Ihre Aktionen sind in der Regel nicht deterministisch und bilden in ihrer Gesamtheit das mikrodynamische Modell des Systems. Im Zusammenspiel der Agenten können die bei systemischen Risiken relevanten emergenten Phänomene und dynamischen Wechselbeziehungen quantitativ untersucht werden. Dabei sind unterschiedliche mathematische Methoden einsetzbar, die ihre Ursprünge in der Molekülphysik haben. Grob zu unterscheiden ist zwischen der direkten Computersimulation wie bei der Moleküldynamik physikochemischer Systeme (Lucas 2007) und der Modellierung mit Wahrscheinlichkeitsfunktionen wie in der Statistischen Mechanik (Lucas 1991). Für ihre Anwendung auf die dynamische Strukturbildung in allgemeinen Systemen sind in beiden Methoden wesentliche Anpassungen und Ergänzungen gegenüber denen in der Molekülphysik erforderlich.

Betrachtet man zunächst die Methode der Wahrscheinlichkeitsfunktionen, so erkennt man hier besonders klar, wie das bei Anwendungen auf systemische Risiken im Allgemeinen nicht deterministische Verhalten der Agenten auf der Mikroebene eingearbeitet werden kann. Betrachtet wird die Evolution des Systems nicht als deterministischer zeitabhängiger Vorgang, sondern als die zeitliche Änderung einer Wahrscheinlichkeitsfunktion in Form einer Mastergleichung. Diese Wahrscheinlichkeitsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, das System zu einer bestimmten Zeit in einer bestimmten Konfiguration anzutreffen. Diese Wahrscheinlichkeit wird erhöht durch Übergänge von benachbarten Konfigurationen zur betrachteten und verringert durch Übergänge von der betrachteten Konfiguration zu benachbarten. Die Mastergleichung ist dann eine stochastische Differenzialgleichung, die sich aus der Bilanz der zufließenden und abfließenden Wahrscheinlichkeiten aufgrund von elementaren Aktionen der Agenten ergibt. Sie stellt eine umfassende Beschreibung der Dynamik eines Systems bereit, einschließlich seiner Fluktuationen, die ihrerseits bei der Annäherung an Instabilitäten auffällig werden und kommende Sprünge in neue Zustände ankündigen. Grundsätzlich ist ihre Form universell, ihre Details liegen in den Übergangsfunktionen, die für jedes zu untersuchende System unter speziellen, empirisch reflektierten Modellannahmen speziell entwickelt werden müssen.

Eine besondere Herausforderung bei der Modellierung stellen sozioökonomische Systeme dar (Weidlich 2000; Helbing 2010). Die Wechselwirkungen zwischen Individuen auf der Mikroebene, z. B. Bürgern einer Gesellschaft oder Mitarbeitern eines Unternehmens, führen zu dynamischen Strukturbildungsprozessen auf der Makroebene. Das Gesamtsystem besteht aus vielen miteinander in einer Wechselwirkung stehenden Teilsystemen in hierarchischer Stratifikation mit individuellen Dynamiken auf den unterschiedlichen Ebenen. Benötigt wird die Mastergleichung als Entwicklungsgleichung für die zahlreichen sozioökonomischen Variablen aus einer Vielzahl von Sektoren und Agenten, die zusammen die Konfiguration des Systems ausmachen.

Im ersten Schritt der Modellierung wird ein dem Problem angepasster Konfigurationsraum festgelegt. Dies bedeutet, dass die Ordnungsvariablen, also die die makroskopische Struktur einschlägig beschreibenden Größen, gewählt werden müssen. Im Gegensatz zu den physikochemischen Modellsystemen folgen diese hier nicht aus mikroskopischen Bewegungsgleichungen, sondern müssen aus empirischen Erkenntnissen und Modellvorstellungen für ein betrachtetes soziales System entwickelt werden. Im zweiten Schritt muss die Mikrodynamik des Systems modelliert werden, also die Veränderung der Makrokonfiguration durch Aktionen der Agenten auf der Mikroebene. Dies erfolgt durch die Einführung von probabilistischen Übergangsraten, die ihrerseits als Funktion von Motivationspotenzialen formuliert werden. In die Formulierung dieser Übergangsraten geht das empirische Wissen über die Aktionen der Agenten in das System ein. Die Übergangsraten zwischen benachbarten Konfigurationen beschreiben die Wahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit, dass der betrachtete Übergang tatsächlich stattfindet. Sie sind mit Nützlichkeitsbewertungen korreliert, die die von den Agenten empfundenen Vorteile der Konfigurationen vor und nach dem Übergang erfassen. Sie werden insbesondere als Funktionen der Makrovariablen angesetzt und reflektieren damit indirekte Wechselwirkungen durch die Rückkopplung über ein internes, hier allerdings nicht materielles Feld sozialen Verhaltens im Konfigurationsraum. Damit stellen sie die für alle Modelle dynamischer Strukturbildungsprozesse konstitutive Zirkelkausalität zwischen den elementaren Ereignissen auf der Mikroebene und den Makrostrukturen sicher.

Im Rahmen des Formalismus der Mastergleichung können außer den indirekten Wechselwirkungen auch die direkten Wechselwirkungen der Agenten untereinander durch die Wahl geeigneter Übergangsraten berücksichtigt werden. Im dritten und letzten Schritt schließlich wird die Mastergleichung aufgestellt, also die Evolutionsgleichung der Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion als Bilanzgleichung zwischen dem Zufluss in eine und dem Abfluss aus einer bestimmten Makrokonfiguration.

Aus der Lösung von Mastergleichungen resultieren Phasenporträts des Systems, d. h. mögliche Attraktoren in stationären Endzuständen und auch die Systemdynamik auf dem Weg in diese Endzustände. Auch Informationen über Fluktuationen und damit die Stabilität von Zuständen sind aus solchen Lösungen ermittelbar. Die quantitativen Ergebnisse hängen von der gewählten Modellierung der Übergangsraten ab, die ihrerseits empirische, nicht a priori gegebene Parameter enthalten. In solchen Fällen, in denen diese Parameter an bekannte empirische Daten angepasst werden können, sind begrenzte Prognosen des Systemverhaltens möglich. In der Regel sind solche Daten nicht verfügbar, sodass man sich auf Szenariestudien beschränken muss, die Aufschlüsse über die inneren Sensibilitäten und kritischen Zustände hervorbringen. Interessante Anwendungen im sozioökonomischen Bereich beziehen sich auf öffentliche Meinungsbildung, Migration, wirtschaftliche Wettbewerbsprozesse und anderes mehr.

Direkte Computersimulationen der Wechselwirkungen der Agenten untereinander vermeiden die Einführung von Wahrscheinlichkeitsfunktionen und damit die Schwierigkeiten bei der Lösung der entsprechenden nicht linearen partiellen Differenzialgleichungen, also der Mastergleichungen. Diese Techniken haben einen besonders breiten Anwendungsbereich gefunden, in allen Bereichen von Natur, Technik und Gesellschaft und in unterschiedlichen Realisierungen. Kommerziell verfügbare Programme erleichtern die praktische Nutzung. Auch auf sozioökonomische Systeme wurden sie angewandt (Schweizer 2003).

Wie in der Molekülphysik liefern im Fall unendlich vieler Agenten beide Vorgehensweisen, die entweder auf Wahrscheinlichkeitsfunktionen oder direkter Computersimulation beruhen, identische Ergebnisse.

Wenngleich der Ausgangspunkt der Modellierung in solchen agentenbasierten Computersimulationen die direkte Wechselwirkung der Agenten untereinander ist, in Gesellschaftssystemen also die zwischen menschlichen Individuen, so lassen sich auch hier indirekte Wechselwirkungen durch solche zwischen den Agenten und einem von ihnen geschaffenen kollektiven Feld erfassen. Im Gegensatz zu den molekulardynamischen Modellen der Molekülphysik reichen hier die newtonschen Bewegungsgleichungen zur Beschreibung der Mikrodynamik nicht aus. Sie können aber z. B. durch verallge-

meinerte Langevin-Gleichungen ersetzt werden, durch die das dynamische Verhalten eines Agenten aufgrund von äußeren Kräften, Wechselwirkungen mit einem kollektiven Feld und stochastischen Diffusionseffekten beschrieben wird. Das kollektive Feld ist nicht notwendigerweise materiell. Es ist vielmehr ein raumzeitliches Kommunikationsfeld, das aus Informationen geschaffen wird, die ihrerseits aus lokalen Aktionen der Agenten resultieren. Die Wechselwirkung zwischen den Agenten und dem kollektiven Feld realisiert daher die zirkuläre Kausalität zwischen Mikro- und Makroebene, die für die dynamische Strukturbildung in allen Systemen konstitutiv ist. Die räumliche Verbreitung von Information im System wird durch einen Diffusionsterm, die begrenzte zeitliche Lebensdauer durch eine Abklingfunktion in der dynamischen Gleichung für das kollektive Feld berücksichtigt. Modelle für die Mikro-dynamik auf Agentenebene können auch zur Entwicklung von Übergangsraten benutzt werden, die in die Mastergleichungsformulierung eingesetzt werden können. Veränderungen der nicht räumlichen, inneren Zustände der Agenten, z. B. von „beschäftigt“ oder „nicht beschäftigt“ bei der Analyse von Migrationsprozessen in einem Wirtschaftssystem, können als chemische Reaktionen modelliert werden, z. B. in Form von Einstellungs- und Entlassungsvorgängen.

Die Analyse dynamischer Strukturbildungsprozesse und der mit ihnen verbundenen systemischen Risiken auf der Basis der hier skizzierten mathematischen Formulierungen hat Potenziale und Grenzen. Die Grenzen ergeben sich zum Teil daraus, dass der betrachtete Formalismus noch nicht in der Lage ist, mathematische Strukturen, die etwa in der Linguistik oder der Ökonomie benutzt werden, einzu-beziehen. Weitere Grenzen ergeben sich dadurch, dass die Brauchbarkeit mathematischer Modelle darauf beruht, dass Realitätsaspekte ausgeblendet werden, die vernachlässigbar erscheinen. In der Praxis können jedoch diese Aspekte durchaus überraschende Effekte ermöglichen. Da zum Beispiel die Aktionen der Agenten, also die Mikro-dynamik, in der Regel nicht in deterministische Gleichungen gefasst werden können, müssen Modellansätze mit empirischen, zunächst unbestimmten Zahlenwerten für die Parameter angesetzt werden. Dies setzt eine natürliche Grenze für den Detaillierungsgrad des Modells. Ein hoher Detaillierungsgrad in der Modellierung der Mikro-dynamik mit zahlreichen empirischen Parametern führt zwangsläufig zu unübersichtlichen Simulationsergebnissen, wobei relevante Effekte möglicherweise durch rechnerische Artefakte überdeckt werden. Wie bei der Analyse auf der Grundlage mathematischer Modelle in anderen Gebieten auch beschränkt man sich daher auf Teilsysteme und Teilprozesse. Diese Einschränkung verbietet zwar grundsätzlich eine realistische Prognose des komplexen Systemverhaltens, hat jedoch das Potenzial, detaillierte Analysen zu ermöglichen, d. h., z. B. Effekte gesondert zu betrachten, die im realen System nur unauflösbar im Verbund mit anderen auftreten. Dies kann detaillierte Einblicke in die Dynamik des jeweiligen Systems ermöglichen, insbesondere durch Parameter- und Szenarienstudien.

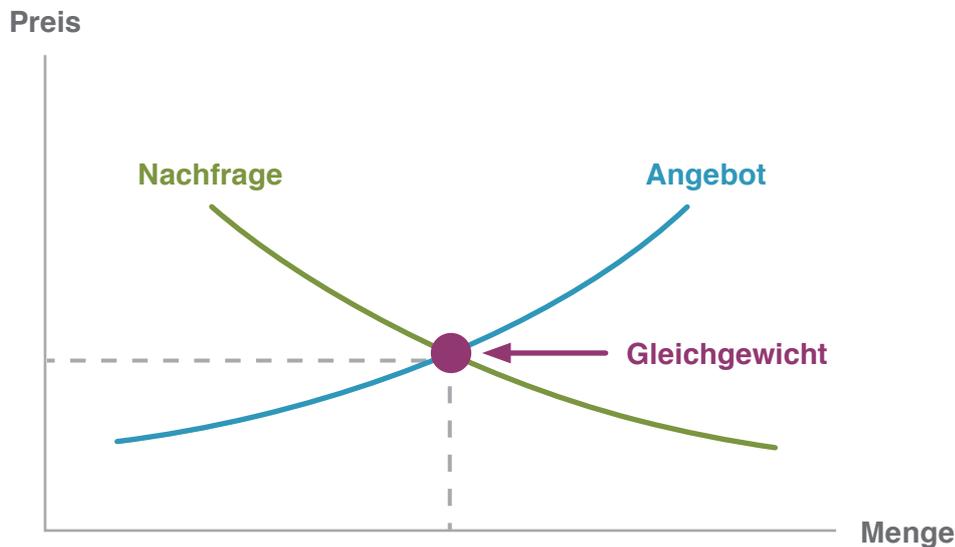
9. Fallstudie: die globale Finanzkrise

Die gegenwärtig einflussreichsten Forschungen zu systemischen Risiken in den Sozialwissenschaften betreffen die globale Finanzkrise, die 2007 einsetzte (Bullard 2009; Haldane/May 2011; Battiston et al. 2016). Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, die allgemeinen Überlegungen zu systemischen Risiken, die in diesem Papier entwickelt werden, anhand der Finanzkrise zu vertiefen.

Der Begriff des systemischen Risikos wird in Bezug auf Finanzmärkte im Gegensatz zum Risiko des Bankrotts einer einzelnen Bank verwendet. Dass Unternehmen scheitern können, ist eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg marktwirtschaftlicher Ordnungen. In diesem Sinn können auch Finanzmärkte letztlich nur sinnvoll funktionieren, wenn einzelne Banken pleitegehen können. Mit dieser Möglichkeit klug umzugehen ist eine wesentliche Aufgabe für das Risikomanagement jeder Bank. Das entsprechende Risiko ist ein konventionelles Risiko von der Art, wie sie fortgeschrittene Industriegesellschaften mit erstaunlichem Erfolg handhaben können. Während jedoch der Bankrott einer Baufirma das Baugewerbe insgesamt keineswegs bedroht, sondern vielmehr der Konkurrenz neue Aufträge zuspielt, kann der Bankrott einer Bank eine Kettenreaktion auslösen. Die Gefahr, dass dies im Endeffekt die gesamten Finanzmärkte in Mitleidenschaft zieht, wird in der Fachliteratur als systemisches Risiko bezeichnet.

Zwei Merkmale systemischer Risiken sind dabei offensichtlich. Zum einen handelt es sich um Risiken nach dem Muster „kleine Ursache, große Wirkung“. Natürlich ist die Pleite einer Großbank aus dem Blickwinkel fast aller Leute nicht „klein“, aber gemessen an der Größe heutiger Finanzmärkte trifft diese Beschreibung sehr wohl zu. Zum anderen hängt die Frage, ob eine Bankenpleite eine Kettenreaktion auslöst, nicht nur und nicht einmal in erster Linie von den Eigenschaften der jeweiligen Bank ab, sondern vom jeweiligen Zustand der relevanten Märkte, also davon ob das System einen instabilen Bereich erreicht hat.

Um die Tragweite dieser Aussagen zu ermessen, ist es wichtig, den aktuellen Stand der ökonomischen Theorie mit der Erfahrung der globalen Finanzkrise zu konfrontieren. In der heutigen Welt bildet die ökonomische Theorie den Orientierungsrahmen, mit dessen Hilfe sich nicht nur Wissenschaftler, sondern auch Entscheidungsträger und Laien in der Welt der Wirtschaft zurechtfinden. Wenn der Ölpreis steigt, so geht jedermann davon aus, dass entweder das Angebot geringer geworden ist (vielleicht durch entsprechende Maßnahmen der OPEC) oder die Nachfrage zugenommen hat (vielleicht durch einen Wachstumsschub in China) oder auch beides zusammen. Fällt der Ölpreis, ist die umgekehrte Erklärung plausibel. Adam Smiths berühmte Metapher von der unsichtbaren Hand des Markts wird heute mit dem Bild eines Schnittpunkts zwischen Angebots- und Nachfragefunktion mathematisch formuliert.



Die Idee des
ökonomischen
Gleichgewichts

Quelle:
IASS; in Anlehnung
an Smith, 2011

Der Begriff des wirtschaftlichen Gleichgewichts bezeichnet dabei eine Situation, in der sich Angebot und Nachfrage die Waage halten, und nicht etwa eine Situation, die sich im Verlauf der Zeit nicht ändert. Preise und Mengen mögen sich beliebig ändern, entscheidend ist, dass sich keine langen Warteschlangen vor leeren Regalen bilden, oder aber wachsende Lagerbestände ohne Kunden für die entsprechenden Produkte. Wie wichtig dieser Begriff ist, lässt sich daran ermessen, dass es den Planwirtschaften des 20. Jahrhunderts eben nicht gelang, solche Warteschlangen und Lagerberge zu vermeiden – was maßgebend zu ihrem Niedergang beitrug.

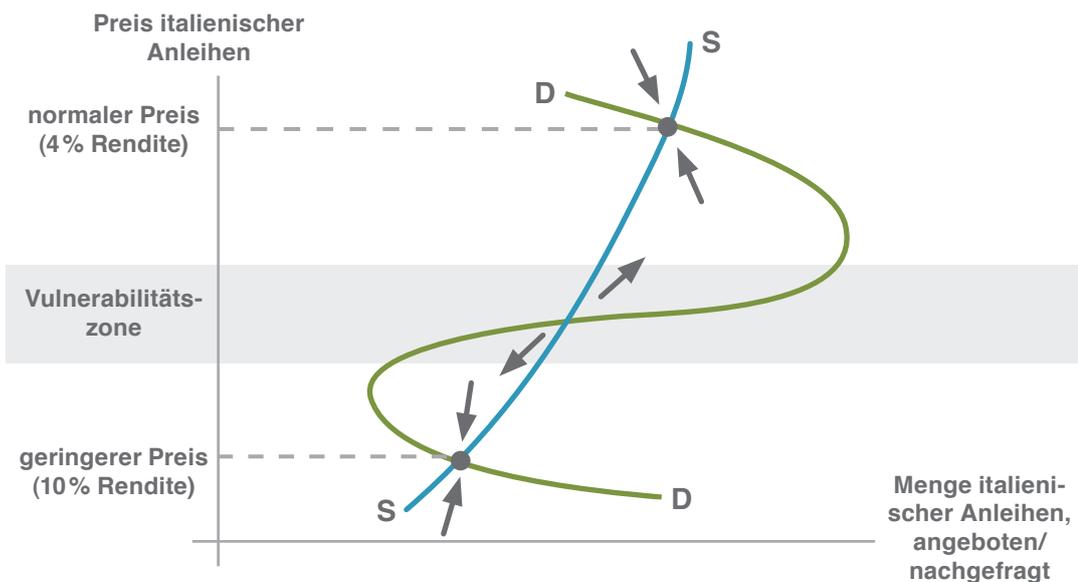
Mathematische Hilfsmittel sind für dieses Verständnis der Funktionsweise von Märkten in doppelter Hinsicht wesentlich. Erstens gelingt es mit statistischen Techniken oft, Angebots- und Nachfragefunktionen ausreichend genau zu schätzen, um die Wirkung begrenzter Veränderungen – etwa von Steuern oder Zöllen – quantifizieren zu können. Zweitens erfordert die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Märkten – für verschiedene Güter, in verschiedenen Ländern, zu verschiedenen Zeitpunkten – anspruchsvollere Modelle, als man auf den ersten Blick vermuten möchte. Entscheidend dafür sind mathematische Fixpunktsätze, die zum Teil direkt als Antwort auf dieses Problem entwickelt wurden (von Neumann 1937).

Auf dieser Grundlage sind in den vergangenen Jahrzehnten Computermodelle entwickelt worden, mit denen Zentralbanken, Regierungen und internationale Organisationen die Wirkung politischer Maßnahmen abschätzen. Allerdings wurden diese Modelle für die tägliche Praxis erst brauchbar, als eine entscheidende Annahme eingeführt wurde: dass sich die Wirtschaft als Ganzes zu jedem Zeitpunkt durch ein einziges Gleichgewicht auszeichne, und dass sie das jeweils aktuelle Gleichgewicht relativ schnell erreiche, wenn sie einmal durch exogene Schocks aus der Bahn geworfen werde. Solche Schocks mögen technologische Innovationen, politische Krisen oder auch Geschmacksveränderungen der Konsumenten sein. Politische Maßnahmen sind innerhalb dieser Sichtweise für die Anpassung an entsprechende Schocks normalerweise nicht erforderlich. Politische Maßnahmen sind in diesem Rahmen grundsätzlich nur erforderlich, wenn externe Effekte dazu führen, dass sich selbst überlassene Märkte wichtige Knappheitsinformationen – etwa über die begrenzte Fähigkeit der Atmosphäre, Treibhausgasemissionen abzubauen – nicht vermitteln können. Das ist die herkömmliche Antwort der ökonomischen Theorie auf die Frage nach der Aufgabe der Wirtschaftspolitik. Als Reaktion auf exogene Schocks sind politische Maßnahmen gemäß dieser Auffassung nur in seltenen Ausnahmefällen

sinnvoll, nämlich dann, wenn gezeigt werden kann, dass sie eine allzu langsame Anpassung beschleunigen können.

Vor diesem Hintergrund sind die Worte zu verstehen, mit denen der Präsident der EZB, Mario Draghi, am 26. Juli 2012 Geschichte schrieb: „Within our mandate, the ECB is ready to do whatever it takes to preserve the euro. And believe me, it will be enough“ (Draghi 2012). In der Tat war es genug: Der Euro hat die damals verbreiteten Zweifel an seinem Fortbestand – und die damit einhergehenden Finanzspekulationen – überlebt. Zunächst war es nicht einmal nötig, dass die EZB diesen gewichtigen Worten noch weitere Taten folgen ließ. Das Wissen, dass die EZB willens war, beliebig viele Euros zu produzieren, um Spekulationen gegen Staatsschulden in europäischer Währung ins Leere laufen zu lassen, genügte. Erst Anfang 2015 begann die EZB dann, solche Schulden in großem Umfang indirekt zu stützen, indem sie über eine Billion Euro an Banken, die entsprechende Bonds kauften, zu günstigen Konditionen auslieh. Draghis legendäre Worte beruhten auf der Analyse, dass die globale Finanzkrise im Allgemeinen und die Eurokrise im Besonderen auf einer Situation multipler Gleichgewichte beruhen.

Die Möglichkeit, dass eine Nachfragekurve nicht monoton fällt, wird außerhalb spezialisierter Fachkreise kaum je in Betracht gezogen, wenn vom Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage die Rede ist. Dieser Fall kann aber durchaus eintreten, z. B., wenn die Nachfrage nach einem Gut davon abhängt, welche Erwartungen die potenziellen Käufer über eine ungewisse Zukunft hegen. Bei Staatsanleihen eines Staates, über dessen Liquidität oder Solvenz Unklarheit besteht, kann das durchaus der Fall sein. Wie die Abbildung verdeutlicht, liegt in solchen Fällen zwischen je zwei potenziell stabilen Gleichgewichten, bei denen eine fallende Nachfragekurve eine steigende Angebotskurve schneidet, jeweils ein instabiles Gleichgewicht, bei dem beide Kurven steigen. Draghis Worte wirkten, weil die europäischen Finanzmärkte zu diesem Zeitpunkt in einer derartigen Situation waren.



Ein Beispiel multipler Gleichgewichte von Angebot und Nachfrage

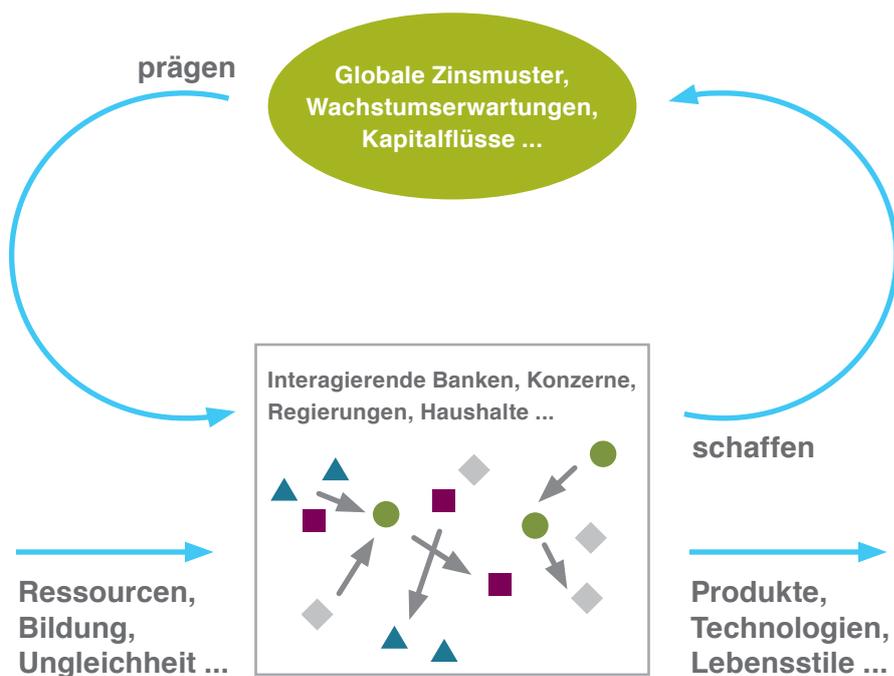
Quelle: IASS; in Anlehnung an BCA Research, 2011

Dadurch entsteht eine dynamische Struktur von der Art, wie sie im vorliegenden Papier erörtert wird. Die globale Finanzkrise hat mit anderen Worten gezeigt, dass systemische Risiken in der Weltwirtschaft mit ähnlichen dynamischen Strukturen einhergehen können, wie sie zur Untersuchung mancher physikalischen Phänomene erarbeitet worden sind. Das hat nichts mit der Vorstellung zu tun, dass menschliche Absichten, Überlegungen und Entscheidungen Illusionen wären, während in Wirklichkeit bloß physikalische Prozesse ablaufen würden. Dass wir Worte ebenso zählen können wie Kieselsteine, bedeutet nicht, dass Worte bedeutungslos wären. Mathematische Beschreibungen können helfen, Muster zu identifizieren, die in ganz verschiedenen Zusammenhängen auftreten.

Entscheidend ist zunächst, zu verstehen, dass die Vielzahl individueller Handlungen auf Aggregatenebene, die insgesamt in darwinschen Selektionsprozessen das Wirtschaftsgeschehen ausmachen, sich oft durch zirkuläre Kausalität zu übergeordneten Mustern fügen. Normalerweise stabilisieren sich makroökonomische Muster und mikroökonomische Handlungen. Wäre das nicht der Fall, wäre die Wirtschaft, so wie wir sie kennen, gar nicht möglich.

Es ist durchaus hilfreich, sich das Beispiel von Fußgängerströmen in Bahnhöfen und ähnlichen Situationen zu vergegenwärtigen: Die einzelnen Fußgänger verfolgen ganz unterschiedliche Pläne und entscheiden situationsabhängig, wie sie ihre Schritte setzen. Insgesamt bilden sich dabei typische Muster heraus, sodass sich nur wenige Fußgänger gegen den jeweiligen Strom fortbewegen.

Die Existenz makroökonomischer Muster bedeutet auch, dass wichtige Dynamiken der Wirtschaft im Sinne von Dekomplexifizierung mit einigen wenigen makroskopischen Größen, sogenannten Ordnungsparametern, erfasst werden können. Dazu gehören die Beschäftigung, das Preisniveau, der Zinssatz und der monetäre Wert der Gesamtproduktion. Je nach Fragestellung werden noch weitere Größen benötigt. Wichtig ist, dass in vielen Fällen eine niedrigdimensionale Beschreibung ausreichend ist.

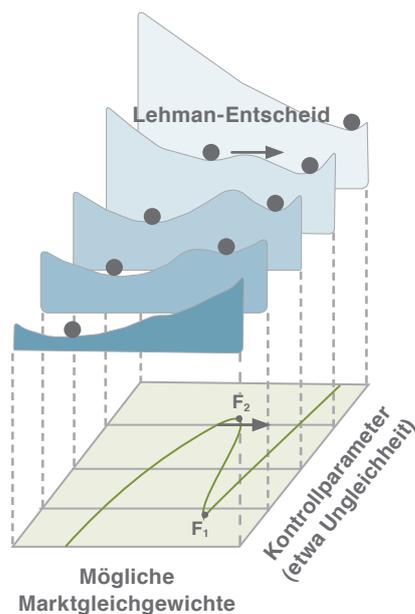


Die Wirtschaft als globales, komplexes System

Quelle:
IASS; in Anlehnung an Metzner, 2016

Wie die Finanzkrise verdeutlicht, kann es nun im Wirtschaftsgeschehen zu Situationen kommen, in denen makroökonomische Muster „auf der Kippe sind“. An solchen Tipping Points, also Instabilitäts- punkten des Systems, können Ereignisse, die auf den ersten Blick unscheinbare Zufälle darstellen, die Wirtschaft in ganz unterschiedliche Zustände versetzen. Dies ist der die Strukturbildung auslösende Effekt zufälliger Fluktuationen. Im Fall Draghis geht der Zufall so weit, dass jene Worte gar nicht im vorbereiteten Redetext standen, sondern Draghi sie ganz kurzfristig in seinen Vortrag einfügt (Der Spiegel 2011). Um nun zu analysieren, was an solchen Bifurkationspunkten geschieht, reicht eine niedrigdimensionale Beschreibung nicht mehr aus; vielmehr muss der Übergang mit einer viel höhe- ren Auflösung analysiert werden, in der eine Vielzahl von Entscheidungen der verschiedensten Akteu- re sichtbar wird. Eine Modellierung der elementaren Dynamik auf der Mikroebene wird erforderlich.

Die berühmte Rede Draghis ist nicht der einzige Fall, in dem die Dynamik der Finanzkrise durch Zufälle, die unter anderen Umständen keine vergleichbar großen Wellen geschlagen hätten, bestimmt wurde. Ein anderes Beispiel ist der Entscheid des Präsidenten der amerikanischen Notenbank, Ben Bernanke, im Herbst 2008, die Bank Lehman Brothers, die er durchaus hätte retten können, pleitege- hen zu lassen. Dieser Entscheid löste eine Kettenreaktion aus, die das amerikanische und damit wohl auch das globale Finanzsystem an den Rand des Zusammenbruchs trieb.



Der Lehman-Entscheidung als systemisches Risiko

Quelle: IASS; in Anlehnung an Scheffler, 2016

Ein weiteres Beispiel ist der Entscheid der 2009 neu gewählten griechischen Regierung, sich von ihrer Vorgängerregierung abzuheben, indem sie überraschend bekannt gab, das griechische Defizit sei viel größer als von ihren Vorgängern angegeben. Die griechische Wirtschaft ist so klein, dass diese Mitteilung unter anderen Umständen so in die politischen Abläufe eingebettet worden wäre, dass sie niemals zur Erschütterung der ganzen Eurozone geführt hätte. Die Wirkung in der damaligen instabilen Situation der Finanzmärkte war demgegenüber katastrophal.

Es wäre allerdings ein Missverständnis der hier vorliegenden dynamischen Strukturen, anzunehmen, dass die Finanzkrise nie eingetreten wäre, wenn Bernanke im Fall Lehman anders entschieden hätte, oder dass der Euro nie in Turbulenzen geraten wäre, wenn Draghi schon 2009 EZB-Präsident gewesen wäre. Vielmehr geht es darum, zu verstehen, dass komplexe Systeme in instabilen Situationen an Bifurkationspunkte geraten können, an denen geringfügige Zufälle das jeweilige System schlagartig in einen anderen Zustand, bis hin zum Zusammenbruch, führen können: ein typischer Zusammenhang zwischen systemischen Risiken und dynamischen Strukturen.

Die Annäherung an einen Bifurkationspunkt wird oft durch Veränderungen der äußeren Umstände bewirkt. Das Tückische daran ist die Tatsache, dass unter Umständen erst im letzten Moment erkennbar wird, dass ein Bifurkationspunkt erreicht ist. Die Abbildung stellt dar, wie die Systemkonfiguration durch einen äußeren Einfluss stetig so verändert wird, dass letztlich ein vergleichsweise geringes Ereignis wie der Entscheid, Lehman nicht zu retten, das ganze System verändert.

Bemerkenswerterweise ist es nun oft so, dass die relevanten äußeren Einflüsse als Ergebnis der Dekomplexifizierung in der Nähe von Instabilitätspunkten wiederum durch einige wenige Größen, die sogenannten Kontrollparameter, erfasst werden können. Natürlich ist es für das Management systemischer Risiken entscheidend, ob diese Kontrollparameter identifiziert und allenfalls beeinflusst werden können. Im Fall der Finanzkrise kamen viele Entscheidungsträger in Europa zu dem Schluss, dass der entscheidende Kontrollparameter das Verhältnis der Staatsverschuldung zum Sozialprodukt sei. Hingegen orientierten sich die meisten Entscheidungsträger in den USA an der Hypothese, dass das Verhältnis der privaten Schulden zum Sozialprodukt sehr viel bedeutsamer sei (soweit sich das aus seinen Worten und Taten ablesen lässt, dürfte auch Draghi zu dieser Auffassung neigen). Die Tatsache, dass die wirtschaftliche Verfassung der USA ein knappes Jahrzehnt nach dem Beginn der Krise um einiges besser ist als jene der EU, ist eines von mehreren Argumenten dafür, dass die dortige Identifikation der Kontrollparameter realitätsnäher war.

Allerdings spricht auch einiges dafür, dass soziale Ungleichheit ein weiterer wichtiger Kontrollparameter ist (Stiglitz 2012). Wie die systemischen Risiken, die in der Finanzkrise sichtbar wurden, in dieser Hinsicht besser gehandhabt werden könnten, dürfte eine der großen Herausforderungen der kommenden Jahrzehnte werden.

10. Ausblick

Seinen Ursprung hat der Begriff des systemischen Risikos in der Finanzwissenschaft. Zunächst wurden damit eher allgemein Risiken bezeichnet, die ein Finanzsystem oder die Ökonomie insgesamt und nicht nur spezifische Marktteilnehmer betreffen. Während das individuelle Anlagerisiko – als Folge der bloßen Marktbewegungen wie etwa Schwankungen des Aktienmarkts – durch Diversifikation des Investmentportfolios verringert werden kann, ist dieser Ausgleich bei systemischen Risiken nicht mehr oder nur in beschränktem Maß möglich, da hier miteinander verbundene Finanzinstitutionen bis hin zu ganzen Märkten in ihrem Bestand und damit potenziell alle Marktteilnehmer betroffen sind. Es gibt in den Finanzwissenschaften bisher keinen analytischen Zugang, durch den systemische Ereignisse charakterisiert und Systemkomponenten oder Systemeigenschaften, welche die Risikoausbreitung begünstigen, identifiziert werden könnten (vgl. De Bandt/Hartmann 2000; Kaufman/Scott 2003; Schwarcz 2008).

Systemische Risiken können jedoch nicht allein in der Ökonomie auftreten, sondern auch in der Welt der physischen und sozialen Risiken. Sie werden darin allgemein auf solche Ereignisse oder Prozesse bezogen, die die Funktionsfähigkeit des betroffenen Systems grundlegend infrage stellen und weit über den Ort ihres Ursprungs oder ihrer unmittelbaren Wirkung hinaus negative Effekte in anderen Bereichen oder Systemen haben (OECD 2003a; Renn 2016). Auch in diesem Verständnis sind systemische Risiken die Folge einzelner Ereignisse oder einer Verkettung von Ereignissen, beispielsweise

Naturkatastrophen, Störfällen, Terrorangriffen, menschlichem Versagen oder Instabilitäten von Systemkomponenten. Ähnlich wie in der Finanzwelt breiten sich die Folgen dieser Ereignisse wie Wellen auf alle damit vernetzten Bereiche aus, die inhaltlich nicht und nur indirekt mit dem Ursprungsereignis verbunden sind.

Systemische Risiken betreffen also ganze Systeme und können deren materielle oder symbolische Grenzen überschreiten. Sie nehmen dabei vielfältige Formen an, z. B. die Schädigung von Ökosystemen, Markteinbrüche oder -verschiebungen, Kapitalentwertung, Handelskonflikte, institutionelle Umbrüche oder politische Vertrauensverluste: „A systemic risk [...] is one that affects the systems on which society depends – health, transport, environment, telecommunications, etc.“ (OECD 2003a: 30). Verdichtungs- und Vernetzungsprozesse spielen dabei eine wesentliche Rolle.

Der eingespielte Prozess von Risikoabschätzung (wissenschaftliche Charakterisierung des Risikos nach Gefährdungspotenzial, Exposition und Dosis-Wirkungs-Beziehung) und Risikomanagement (Feststellung eines politischen Handlungsdruckes sowie Wahl der geeigneten Instrumente zur Risikominderung) behandelt traditionell die direkten physischen Folgen für Mensch und Umwelt innerhalb der jeweiligen Systemgrenzen. Durch die bereits beschriebenen zentralen Eigenschaften systemischer Risiken versagen die herkömmlichen Mittel des Risikomanagements und der Regulierung.

Aufgrund ihres dynamischen Ausbreitungsverhaltens sind systemische Risiken schwer zu erfassen und zu regulieren. Sie verlangen nach neuen Institutionen und Verfahren, die sich gezielt der sekundären und tertiären Schadenswirkungen in den Auslagerungsbereichen annehmen. Damit verbunden ist die Notwendigkeit zur Ausbildung neuer Bewertungsprozesse, die auf die zentralen Eigenschaften systemischer Risiken wie (soziale) Verstärkung, Komplexität, Ungewissheit und Ambiguität zugeschnitten sind. Diese Anforderungen können Systeme der Risikosteuerung aber nur übernehmen, wenn die Wissenschaft den Risikomanagern gute Modelle für die Erfassung und Steuerung systemischer Risiken an die Hand gibt. Das können keine Rezeptbücher sein, aber dennoch formal nachvollziehbare und empirisch validierbare Orientierungen, die zum einen eine Früherkennung von nicht linearen Wirkungsbeziehungen erlauben und zum anderen helfen, Schlüsselvariablen zu identifizieren, die in Krisensituation zentrale Funktionen für das weitere Systemverhalten ausüben. Diese Anforderungen müssen in ein auf systemische Risiken abgestimmtes Modell von „Risk Governance“ eingespeist werden (Hood et al. 2001; Hutter 2006; Taylor-Gooby/Zinn 2006; Renn 2008). Risk-Governance betont die Notwendigkeit innovativer Koordinations- und Kooperationsprozesse, die die Grenzen der traditionellen hierarchisch-dirigistischen Interventionsformen überwinden und neue institutionelle Verfahren der Problemdefinition und Steuerung begünstigen. Solche Prozesse sind Ausdruck einer horizontalen Politik, bei der die Kooperation zwischen den Akteuren sowie eine systematische Rückkopplung und Koordination der staatlichen Akteure mit gesellschaftlichen Akteuren stattfinden müssen. Damit steht Risk-Governance paradigmatisch für einen Multi-Level-Stakeholder-Ansatz, bei dem systemische Risiken in der Wechselwirkung von physischen Konsequenzen, finanziellen Absicherungen und ihren psychologischen, sozialen und kulturellen Auswirkungen betrachtet werden (Zinn/Taylor-Gooby 2006). Nur eine solche Politik kann den besonderen Gegebenheiten systemischer Risiken gerecht werden.

Die Auseinandersetzung mit systemischen Risiken ist ein notwendiger Beitrag zur Stärkung der Handlungsfähigkeit moderner Gesellschaften im Umgang mit einem neuen Typ von Risiken, die sich aus der Globalisierung, Vernetzung und zunehmenden Eingriffstiefe menschlicher Interventionen in Natur, Wirtschaft und Gesellschaft ergeben. Die in diesem Aufsatz erarbeiteten Grundlagen für ein besseres Verständnis der Strukturbildung und der Prozessdynamik von systemischen Risiken sind erste Schritte auf dem Weg zur Entwicklung eines umfassenden Verständnisses dieser Form von Risiken und praxisrelevanter Handlungsstrategien der Risikobewältigung.

Weitergehende Forschung ist mehr als nötig. So sollte nicht nur geklärt werden, was systemische Risiken von anderen und bereits intensiv diskutierten Formen der (Selbst-)Gefährdung moderner Gesellschaften unterscheidet. Die hier aufgeworfenen Fragen einer homomorphen Strukturbildung über verschiedene Domänen hinweg fordern auf, darüber nachzudenken, wie interdisziplinäre Forschung in diesem Bereich gestaltet werden muss, um auf der Basis abstrakter Modellberechnungen die Erforschung empirisch valider Erkenntnisse zu befruchten und politisch wirksame Verfahren und Institutionen einer horizontalen, partizipativen Risk-Governance zu entwickeln.

Literatur

- Arpe, J.; Glockner, H.; Hauschild, H.; Petersen, T.; Schaich, A. und Volkmann, T. (2012):** Die ökonomischen Risiken der Globalisierung. Ergebnisse einer Experten- und einer Bürgerbefragung. *Global Choices*, 1. Bertelsmann-Stiftung. Media and More: Gütersloh.
- Battiston, S.; Farmer, J. D.; Flache, A.; Garlaschelli, D.; Haldane, A. G.; Heesterbeek, H.; Hommes, C.; Jaeger, C.; May, R. und Scheffer, M. (2016):** Complexity theory and financial regulation. *Science*, 351, S. 818–819.
- Belousov, B. P. (1959):** Периодически действующая реакция и ее механизм [Periodically acting reaction and its mechanism]. *Сборник рефератов по радиационной медицине*, 147, S. 145.
- Bénard, H. (1900):** Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. *Revue Générale des Sciences*, 1261–1271, S. 1309–1328.
- Bullard, J.; Neely, C. J. und Wheelock, D. C. (2009):** Systemic Risk and the Financial Crisis: A Primer. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, September/Okttober, 1, S. 403–417.
- De Bandt, O. und Hartmann, P. (2000):** Systemic Risk: A Survey. *Working Paper Series/ European Central Bank*, 35. European Central Bank: Frankfurt/Main, S. 10.
- Diamond, J. (2006):** Kollaps. Warum Gesellschaften überleben und untergehen. Fischer: Frankfurt am Main
- Dietz, T.; Ostrom, E. und Stern, P. C. (2003):** The Struggle to Govern the Commons. *Science*, 302, S. 1907–1912.
- Draghi, M. (2012):** Speech by Mario Draghi, President of the European Central Bank at the Global Investment Conference in London 26 July 2012. www.ecb.europa.eu/press/key/date/2012/html/sp120726.en.html (letzter Zugriff: Januar 2017).
- Dubben, H.-H. und Beck-Bornholdt, H.-P. (2006):** Mit an Wahrscheinlichkeit grenzender Sicherheit. Logisches Denken und Zufall. 3. Auflage. Rowohlt: Reinbek bei Hamburg.
- Dubois, D. und Guyonnet, D. (2011):** Risk-informed Decision-Making in the Presence of Epistemic Uncertainty. *International Journal of General Systems*, 40, S. 145–167.
- Ehrlich, P. R. und Ehrlich, A. H. (2009):** The Dominant Animal. Human Evolution and the Environment. Island Press: Washington, D. C., S. 364–387
- Fischhoff, B. (2007):** Nonpersuasive Communication about Matters of Greatest Urgency: Climate Change. *Environmental Science & Technology*, 41, S. 7204–7208.
- Gerstengarbe, F.-W. und Welzer, H. (Hrsg.) (2013):** Zwei Grad mehr in Deutschland. Wie der Klimawandel unseren Alltag verändern wird. Fischer: Frankfurt am Main.
- Glansdorff, P. und Prigogine, I. (1971):** Thermodynamics Theory of Structure, Stability and Fluctuations. John Wiley & Sons: London.
- Haken, H. (1986):** Erfolgsgeheimnisse der Natur. Deutsche Verlagsanstalt: Stuttgart.
- Haken, H. und Wunderlich, A. (1991):** Die Selbststrukturierung der Materie. Vieweg: Braunschweig.
- Haldane, A. G. und May, R. M. (2011):** Systemic Risk in Banking Ecosystems. *Nature*, 469, S. 351–355.

- Helbing, D. (2010):** Quantitative Socodynamics. Springer: Berlin.
- Hood, C.; Rothstein, H. und Baldwin, R. (2001):** The Government of Risk: Understanding Risk Regulation Regimes. Oxford University Press: Oxford.
- Hutter, B. M. (2006):** Risk, regulation, and management. In: P. Taylor-Gooby und J. O. Zinn (Hrsg.): Risk in Social Science. Oxford University Press: Oxford, S. 202–227.
- Jaeger, C. (2016) The Coming Breakthrough in Risk Research. Economics:** The Open Access, Open Assessment E-Journal, 10, 1–29, doi:10.5018/economics-ejournal.ja.2016–16.
- Kandil, F. (1983):** Nativismus in der Dritten Welt. Wiederentdeckung der Tradition als Modell für die Gegenwart. J. G. Bläschke Verlag: St. Michael/Österreich
- Kant, I. (1777, ursprünglich 1786):** Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft, A VIII. Werke in zwölf Bänden. Band 9. Suhrkamp: Frankfurt am Main.
- Kaufman, G. und Scott, K. E. (2003):** What is Systemic Risk, and Do Bank Regulators Retard or Contribute to It? *The Independent Review*, 7 (3), S. 371–391.
- Löfstedt, R. (2003):** Riskworld. *Risk Research*, 6 (1–4), S. 289–619.
- Lorenz, E. (1995):** The Essence of Chaos. Appendix 1. University of Washington Press: Seattle, S. 181–184.
- Lucas, K. (1991):** Applied Statistical Thermodynamics. Springer: Berlin.
- Lucas, K. (2007):** Molecular Models for Fluids. Cambridge University Press: New York.
- Lucas, K. und Roosen, P. (Hrsg.) (2010):** Emergence, Analysis and Evolution of Structures. Springer: Berlin.
- Lucas, K. (2016):** Denn wir wissen nicht, was wir tun. *VDI-Nachrichten*, 21, 27. Mai 2016.
- Malone, E. L. (2009):** Debating Climate Change. Pathways through Argument to Agreement. Earthscan: London.
- Metzner, W. C. (1985):** Nicht-lineare Dynamik und Chaos. Teubner: Stuttgart.
- Metzner, C. (2016):** Complex systems. <http://cmbiophys.blogspot.de> (letzter Zugriff: Dezember 2016).
- National Research Council (2010):** Advancing the Science of Climate Change. The National Academies Press: Washington, D. C.
- Neumann, J. von (1937):** Über ein ökonomisches Gleichungssystem und eine Verallgemeinerung des Brouwerschen Fixpunktsatzes. In: K. Menger (Hrsg.): Ergebnisse eines mathematischen Kolloquiums, 1935–36. Leipzig, erneut abgedruckt bei Kiepenheuer & Witsch: Köln, S. 172–181 (ISBN 346201028X.)
- OECD (2003a):** Emerging Risks in the 21st Century. An Agenda for Action. OECD: Paris.
- OECD (2003b):** Global Shocks: Improving Risk Governance. OECD: Paris.
- Olson, H. G. (2010):** Handbuch der Klimalügen. Ein Dokument nachhaltiger Lügen zur Rettung der Welt, verbreitet durch das Kartell der Klimaforscher und ihre eindeutige Widerlegung durch die Wissenschaft. 2. Auflage; TvR Medienverlag: Jena.
- Peters, H.-P. und Heinrichs, H. (2005):** Öffentliche Kommunikation über Klimawandel und Sturmflutrisiken. Bedeutungskonstruktionen durch Experten, Journalisten und Bürger. *Schriften des Forschungszentrum Jülich*, No 58.
- Peters, G. P.; Marland, G.; Le Quere, C.; Boden, T.; Canadell, J. G. und Raupach, M. R. (2012):** Rapid Growth in CO₂ Emissions after the 2008–2009 Global Financial Crisis. *Nature Climate Change*, 2, S. 2–4 (DOI:10.1038/nclimate1332).

-
- Prigogine, I. (1979):** Vom Sein zum Werden. Piper & Co.: München.
- Randers, J. (2012):** 2052. Der neue Bericht an den Club of Rome. Eine globale Prognose für die nächsten 40 Jahre. Oekom: München
- Renn, O. (2008):** Risk governance. Coping with uncertainty in a complex world. Earthscan: London.
- Renn, O. und Keil, F. (2009):** Was ist das Systemische an systemischen Risiken? GAIA, 18 (2), S. 97–99.
- Renn, O. (2016):** Systemic risks: the new kid on the block. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 58 (2), S. 26–36. <http://dx.doi.org/10.1080/00139157.2016.1134019> (letzter Zugriff: 2. Februar 2016).
- Reusswig, F. (2011):** Klimawandel und globale Umweltveränderungen. In: M. Groß (Hrsg.): Handbuch Umweltsoziologie. VS Verlag für Sozialwissenschaften: Wiesbaden, S. 692–720
- Risbey, J. und Kandlikar, M. (2007):** Expressions of Likelihood and Confidence in the IPCC Uncertainty Assessment Process. *Climatic Change*, 85, S. 19–31.
- Rosa, E. A. und Dietz, T. (2010):** Global Transformations: Passage to a New Ecological Era. In: E. A. Rosa; A. Diekmann, T. Dietz und C. C. Jaeger (Hrsg.): Human Footprints on the Global Environment. MIT Press: Cambridge/USA, S. 1–45.
- Rothstein, H.; Huber, M. und Gaskell, G. (2006):** A theory of risk colonisation: The spiralling logics of societal and institutional risk. *Economy and Society*, 35 (1), S. 145–167.
- Scheffer, M. (2016):** Critical transitions in a nutshell. <http://www.sparcs-center.org/key-concepts/tipping-points-and-resilience.html> (letzter Zugriff: 12. Dezember 2016).
- Schwarcz, S. L. (2008):** Systemic Risk. *The Georgetown Law Journal*, 97 (1), S. 193–249.
- Sheldrake, R. (2015): Der Wissenschaftswahn. Droemer: München.
- Smith, S. (2011):** Supply and Demand. <http://stephansmithfx.com/explanations/supply-and-demand> (letzter Zugriff: 12. Dezember 2016).
- Sornette, D. (2003):** Why Stock Markets Crash. Princeton University Press: Princeton.
- Spiegel, P. (2014):** Draghi's ECB management: the leaked Geithner files. <http://blogs.ft.com/brusselsblog/2014/11/11/draghis-ecb-management-the-leaked-geithner-files> (letzter Zugriff: 12. Dezember 2016).
- Spiegelhalter, D. J. und Riesch, H. (2011):** Don't Know, Can't Know: Embracing Deeper Uncertainties When Analysing Risks. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A 369, S. 4730–4750.
- Stieglitz, J. (2012):** The Price of Inequality: How Today's Divided Society Endangers Our Future. W. W. Norton & Company: New York.
- Swart, R.; Bernstein, L.; Ha-Duong, M. und Petersen, A. (2009):** Agreeing to Disagree: Uncertainty Management in Assessing Climate Change, Impacts and Responses by the IPCC. *Climatic Change*, 92, S. 1–29.
- Swiss Re (2012):** Identifying Emerging Risks. http://www.swissre.com/rethinking/emerging_risks/emerging_risks.html (letzter Zugriff: 15. April 2016).
- Taylor-Gooby, P. (2006):** Social and public policy: Reflexive individualisation and regulatory governance. In: P. Taylor-Gooby und J. O. Zinn (Hrsg.): Risk in Social Science. Oxford University Press: Oxford, S. 271–287.
- Taylor-Gooby, P. und Zinn, J. O. (2006):** The Current Significance of Risk. In: P. Taylor-Gooby und J. O. Zinn (Hrsg.): Risk in Social Science. Oxford University Press: Oxford, S. 1–19.

- The Economist (2011):** The illustrated euro crisis: Multiple equilibria. <http://www.economist.com/blogs/freeexchange/2011/10/illustrated-euro-crisis> (letzter Zugriff: 28. Januar 2017).
- Thurner, D. (2012):** *Systemic Financial Risk*. OECD Reviews of Risk. OECD: Paris.
- Turing, A. M. (1952):** The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B 237, S. 37–72.
- Vahrenholt, F. und Hüning (2011):** Die kalte Sonne: Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet. Hoffmann und Campe: Hamburg.
- Weidlich, W. (2000):** *Sociodynamics*. Dover: New York.
- Weiss, T. G. (2000):** Governance, Good Governance and Global Governance: Conceptual and Actual Challenges. *Third World Quarterly*, 21 (5), S. 795–814.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (1999):** Welt im Wandel. Strategien zur Bewältigung globaler Umweltrisiken. Jahresgutachten 1998. Springer: Heidelberg und Berlin.
- World Economic Forum: Global Risks 2013:** 7. Auflage. WEF/OECD: Genf.
- Zinn, J. O. und Taylor-Gooby, P. (2006):** Risk as an interdisciplinary research area. In: P. Taylor-Gooby und J. O. Zinn (Hrsg.): *Risk in Social Science*. Oxford University Press: Oxford, S. 20–53.

Zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. Klaus Lucas

Leiter des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik, RWTH Aachen, Fellow am Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Potsdam

Prof. Dr. Carlo C. Jaeger

Professor für Modellierung sozialer Systeme an der Universität Potsdam, Professuren an der Beijing Normal University und der Arizona State University, Fellow am Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Potsdam

Prof. Dr. Ortwin Renn

Wissenschaftlicher Direktor am Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS), Potsdam



IASS Discussion Paper

März 2017

Institute for Advanced Sustainability Studies Potsdam (IASS) e. V.

Kontakt:

Ortwin.Renn@iass-potsdam.de

Adresse:

Berliner Strasse 130
14467 Potsdam
Deutschland
Telefon 0049 331-28822-340
www.iass-potsdam.de

E-Mail:

media@iass-potsdam.de

Vorstand:

Prof. Dr. Mark G. Lawrence,
Geschäftsführender Wissenschaftlicher Direktor
vertretungsberechtigt

Prof. Dr. Patrizia Nanz, Wissenschaftliche Direktorin
Prof. Dr. Ortwin Renn, Wissenschaftlicher Direktor

DOI: 10.2312/iass.2017.007

