

Turbulenz als strukturbildende Unruhe

Ein Beitrag zur disziplinären Unruhe zwischen Naturwissenschaften und Soziologie

Martin Hauff

Beitrag zur Ad-hoc-Gruppe »Turbulenz: Zur Soziologie unruhiger Verhältnisse«

Einleitung

Das Phänomen der Turbulenz stellt ein Problem in der Geschichte der Naturwissenschaften dar. Für die Berechnung der Dynamik von Fluiden, also Flüssigkeiten oder Gasen, hatte sich die Navier-Stokes-Gleichung als nützlich erwiesen. Diese Gleichung kommt jedoch bei Turbulenzen an die Grenzen der Berechenbarkeit. Das hat einen prinzipiellen Grund: Stellt man sich Gase oder Flüssigkeiten als eine Ansammlung von sehr vielen Molekülen vor, so zeigt das von Henri Poincaré entdeckte Dreikörperproblem, dass es kein analytisch lösbares mathematisches Modell gibt, das die Wechselwirkungen bereits von drei Körpern berechnen könnte. Wenn Millionen von Molekülen miteinander wechselwirken, ist das System der Wechselwirkungen noch komplexer.

Mathematische Modelle, die turbulente Strömungen beschreiben, lassen sich zwar nicht analytisch, aber numerisch lösen, was durch Computermodelle vereinfacht wird. Mithilfe von Computersimulationen lässt sich die Dynamik von Fluiden simulieren. Zentrale Erkenntnis dabei ist, dass auch kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede im Zeitverlauf bewirken können (deterministisches Chaos). Gleichzeitig konnte aber auch gezeigt werden, dass aus der unendlichen Komplexität der Wechselwirkungen Muster und Strukturen entstehen können. Die Chaostheorie hat seit Mitte der 1970er Jahre gezeigt, dass sich aus dem Chaos heraus neuartige Strukturen bilden können (Order from Noise). Diese Forschungen zeigen, dass Prozesse aufgrund ihrer Nichtlinearität an bestimmten Tipping Points plötzlich in Turbulenz umkippen können, aber auch, dass aus den Turbulenzen heraus neuartige Muster und Strukturen entstehen können. Turbulenz und Ordnung stehen in einem sich wechselseitig beeinflussenden Verhältnis.

Das Santa Fe Institut hat seit den 1980ern diese Komplexitätsforschung vorangetrieben und Forscher/-innen aus den Natur- und Sozialwissenschaften zusammengebracht. Brian Arthur hatte die Complexity Economics begründet und in Orientierung an der naturwissenschaftlichen Komplexitätsforschung versucht, Modelle für die Beschreibung von Dynamiken und Turbulenzen auf Märkten, speziell Finanzmärkten, zu finden (Arthur 2015). Aber auch in der Soziologie wurde die Komplexitätsforschung rezipiert und v.a. durch Renate Mayntz kritisch reflektiert (Mayntz 1991). Mayntz betont, dass die Computermodelle aus der Komplexitätsforschung als Vielteilchensysteme funktionieren und als Bottom-Up-

Modelle zu verstehen sind. In der Gesellschaft gibt es aber emergente Phänomene, wie soziale Gruppen, Institutionen, Organisationen etc., die durch eine kollektive Zielsetzung charakterisiert sind und eine kausale Wirkung auf die Handelnden besitzen.

Die Systemtheorie Niklas Luhmanns verfolgt den Anspruch, einen soziologischen Komplexitätsbegriff zu entwickeln. Dabei spielt auch der Begriff der Turbulenz eine Rolle. Für Luhmann sind Turbulenzen also konstitutiv für die Systeme, bergen aber gleichzeitig katastrophisches Potenzial, ein Oszillieren zwischen Ordnung und Unordnung. Mayntz und Luhmann übertragen nicht einfach die Forschungsergebnisse der Komplexitätsforschung auf die Soziologie, sondern die Begriffe der Komplexität und Turbulenz erfahren durch ihre Reflexion in der soziologischen Theorie eine Spezifizierung.

Im Folgenden sollen die Entwicklungen der naturwissenschaftlichen Komplexitätstheorie und die Konzeption des Begriffs der Turbulenz zusammengefasst werden. Daraufhin soll untersucht werden, wie dieser naturwissenschaftliche Turbulenzbegriff für die Sozialwissenschaften, speziell die Soziologie, fruchtbar gemacht werden kann. Dabei sollen die Ansätze von Renate Mayntz und Niklas Luhmann vorgestellt werden.

Turbulenz in komplexen, natürlichen Systemen

Der Meteorologe Edward Lorenz arbeitete ab 1960 am MIT mithilfe eines Computers an Wettermodellen. Es war üblich, die Zahlen nach der dritten Kommastelle aufzurunden. Als er eine Berechnung eines Wettermodells ein zweites Mal durchführte, rundete er die Zahlen für Temperatur, Luftdruck und Windrichtung von sechs auf drei Nachkommastellen. Er ging davon aus, dass diese minimalen Unterschiede sich im Modell ausgleichen würden. Jedoch musste er feststellen, dass die Ergebnisse, je weiter sie numerisch ausgerechnet wurden, immer extremer voneinander abwichen. Dadurch fand Lorenz heraus, dass in komplexen Systemen, wie dem Wetter, kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen nach einiger Zeit zu großen Unterschieden bei den Werten führen können (Briggs und Peat 1995, S. 96). Lorenz hatte jedoch Schwierigkeiten, seine neuen Erkenntnisse zu veröffentlichen. 1963 gelang ihm schließlich eine Publikation unter dem Titel „Deterministic Nonperiodic Flow“, die jedoch kaum beachtet wurde. Erst knapp zehn Jahre später wurde durch den Physiker James Yorke 1972 der Aufsatz von Lorenz wiederentdeckt (Paslack 1991, S. 127). James Yorke baute auf den Arbeiten von Lorenz auf und veröffentlichte 1975 den Artikel „Period Three Implies Chaos“, wodurch er den Begriff des Chaos in den Diskurs einführte. Der Biologe Robert May, der mit Yorke befreundet war, erkannte in diesen Jahren Ähnlichkeiten zwischen diesen neuen Entdeckungen und Phänomenen aus der Populationsdynamik, speziell der sogenannten Verhulst-Gleichung. Robert May stellte fest, dass ab der Größe 3,57 des Wachstumsfaktors die Populationsdynamik chaotisches Verhalten aufweist. 1978 experimentierte Mitchell Feigenbaum mit Gleichungen von May und verallgemeinerte das Modell (Paslack 1991, S. 131). Bei allen dynamischen Systemen ist nach Feigenbaum der Übergang zum Chaos durch oszillierendes Verhalten des Parameterbereichs gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um ein deterministisches Chaos, denn die Gleichungen beinhalten keine stochastischen Bestandteile. Jeder Berechnungsschritt ist durch die Formel determiniert und trotzdem entsteht ab einem kritischen Punkt Chaos. Berühmt wurde das sogenannte Feigenbaum-Diagramm, das diese Entwicklungen hin zum Chaos grafisch darstellt.

Ende der 1970er wurden diese Beobachtungen und mathematischen Modelle immer mehr bestätigt. Aus der Perspektive dieses Paradigmenwechsels betrachtete man nun Forschungen der Vergangenheit als gewisse Vorläufer. Am prominentesten ist Henri Poincaré, der 1885 bei einem Preisausschreiben der Frage nach der vollständigen Berechenbarkeit des Planetensystems nachging und letztlich Belege für die Grenzen der Berechenbarkeit fand. Dies ist als das Dreikörperproblem in die Geschichte eingegan-

gen. Bei drei Körpern sind deren Wechselwirkungen, die Rückkopplungen der Krafteinwirkungen, so verwickelt und komplex, dass sich der zukünftige Zustand zu jedem beliebigen Zeitpunkt nicht mehr berechnen lässt.

Neben den Forschungen von Poincaré haben die Versuche zur Berechnung von Strömungen und Turbulenzen eine zentrale Vorarbeit zur Chaostheorie geleistet. Bei Strömungen von Fluiden, also von Flüssigkeiten oder Gasen, wechselwirken die Teilchen, sodass geordnete Wellen oder auch chaotische Turbulenzen entstehen können. Einen ersten Versuch, eine mathematische Annäherung an Strömungsphänomene zu finden, stellt die Euler-Gleichung der Strömungsmechanik von 1757 dar, in der Leonhard Euler von idealisierten Annahmen ausgeht. Etwas realistischer ist die Navier-Stokes-Gleichung von 1827, die die Viskosität berücksichtigt und heutzutage noch Anwendung findet. Diese kommt aber bei Turbulenzen an ihre Grenzen. Eberhard Hopf hat 1948 ein Modell entwickelt, das Bifurkationen, also die Aufgabelung von Trajektorien, als wesentliches Phänomen auf dem Weg eines Systems zu turbulentem Verhalten beschreibt. Mithilfe dieses Modells konnten kritische Punkte ausgemacht werden, bei denen sich das Strömungsverhalten schlagartig ändern kann (Briggs und Peat 1995, S. 69). Aufbauend auf dieser Arbeit entwickelten David Ruelle und Floris Takens 1971 ein Modell, das einen viel sprunghafteren Übergang in die Turbulenz beschreiben konnte. Zur Charakterisierung dieses Modells prägten sie die Bezeichnung des seltsamen Attraktors. Auch beim Lorenz-Attraktor, der im Wettermodell vorkommt, handelt es sich um einen solchen seltsamen Attraktor. Dadurch lassen sich komplexe Systeme mathematisch besser verstehen.

Turbulenz in komplexen, sozialen Systemen

Die Herausforderung, die die mathematische Beschreibung von Turbulenzen in natürlichen Systemen den Naturwissenschaften zeigte, führte zur Komplexitätstheorie, die mit neuartigen Methoden versuchte, Modelle zur Simulation und Berechnung komplexer und chaotischer Prozesse zu entwickeln. Von naturwissenschaftlicher Seite selbst kam relativ schnell auch der Gedanke auf, soziale Prozesse mit ähnlichen Modellen beschreibbar zu machen. Nur sind es in sozialen Zusammenhängen nicht Atome oder Moleküle, sondern Menschen, also soziale Atome. Das Santa Fe Institut in New Mexiko hat in diesem Bereich Pionierarbeit geleistet. Soziale Prozesse sind demnach nichts anderes als das komplexe Zusammenwirken einer großen Anzahl von handelnden Individuen. Ähnlich wie die Dynamiken von Fluiden können auch soziale Dynamiken in Turbulenzen geraten.

Im Forschungskontext des Santa Fe Instituts wurde vor allem das Wirtschaftssystem als Anwendungsfall gefunden. Besonders Brian Arthur trat dabei hervor. Im September 1987 fand am Santa Fe Institut der Workshop statt, der der Frage nachging, wie die Komplexitätstheorie am besten auf wirtschaftliche Zusammenhänge angewendet werden könnte (Waldrop 1992, S. 137). Die Forschungsarbeiten dieses Workshops wurden in einem Sammelband mit dem Titel *The Economy as an Evolving Complex System* herausgegeben. Zu diesem Band trug Brian Arthur den Aufsatz „Self-Reinforcing Mechanisms in Economics“ bei. In diesem Text beschreibt er den Lock-In-Effekt, der dem Prinzip der *increasing returns* folgt. Brian Arthur leitete im Anschluss an diesen Workshop das Forschungsprogramm zu ökonomischen Themen am Santa Fe Institut und gab 1997 einen zweiten Sammelband heraus, der die Fortschritte in diesem Forschungsbereich zusammenfasste. Mittlerweile wurden die sogenannten Agent-Based-Modelle entwickelt, die nun als Methode auch Eingang in die Beiträge des Sammelbandes erhielten. Agent-Based-Modelle bilden die Grundlage für komplexer aufgebaute Computersimulationen, die nichtlineare und chaotische Prozessdynamiken simulieren können. Arthur entwickelte mit dem Informatiker John Holland und anderen ein Computermodell für einen künstlichen Aktienmarkt,

das er in seinem Beitrag zu diesem Sammelband vorstellte. Damit gilt Brian Arthur als ein zentraler Mitbegründer der Complexity Economics (Arthur 2015).

Es hat sich mittlerweile die soziologische Richtung der *Computational Social Science* etabliert, die verschiedenste soziale Prozesse mithilfe von Computersimulationen zu modellieren versucht (Squazzoni 2012). Konzeptionell haben sich auch hier die Agent-Based-Modelle etabliert. Klassisches Anwendungsbeispiel ist die Simulation des Autoverkehrs und die Erforschung der Ursachen der Entstehung von Staus. Ein weiteres ist die Modellierung von Fußgängerströmen, die mit der forschungspraktischen Frage verknüpft ist, wie man Fußgängerströme so leiten und Fluchtwege so einrichten kann, dass im Fall von Panik die Menschen sich ohne Gefahr bewegen können. Die soziologische Forschung, die in dieser Tradition steht, ist von der Notwendigkeit der Ver(natur-)wissenschaftlichung der Sozialwissenschaften überzeugt. So haben sich in diesem Zusammenhang auch die Begriffe *Sociophysics* oder *Econophysics* etabliert. Für die Richtung der *Computational Social Science* ist aktuell die Zeitschrift *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* (JASSS) einschlägig.

Renate Mayntz

Eine zu große Nähe zu den Naturwissenschaften wurde von einigen Soziolog/-innen jedoch bemängelt, da jene Modelle dem Typischen des Sozialen nicht gerecht werden würden. Renate Mayntz setzt sich mit der Übertragung naturwissenschaftlicher Modelle in die Sozialwissenschaften auseinander. In einem Aufsatz aus dem Jahr 1990 schreibt sie, dass nicht nur aufseiten der Soziologie eine Nachfrage nach naturwissenschaftlichen Modellen besteht, sondern dass auch namhafte Naturwissenschaftler selbst die Übertragung ihrer Modelle auf den sozialen Bereich versucht haben (Mayntz 1991).

„Was die Attraktivität der neuen naturwissenschaftlichen Modelle für Soziologen angeht, mag der normative oder emotionale Anmutungscharakter von Begriffen wie Selbstorganisation, Katastrophe und Chaos, aber auch der Wunsch, den prestigeträchtigen harten Wissenschaften nachzueifern, die Rezeptivität gelegentlich erhöht haben. Wichtiger sind aber die in der Tat augenfälligen formalen Ähnlichkeiten zwischen naturwissenschaftlichen Modellen nichtlinearer Dynamik und bestimmten sozialen Prozessen.“ (Mayntz 1991, S. 60)

So könnten komplexitätstheoretische Modelle einen Beitrag zur Lösung des in der Soziologie vielfach diskutierten Mikro-Makro-Problems anbieten. Jedoch funktionieren diese Modelle nur in einem Vielteilchensystem, d.h. als Beobachtungsgegenstand können nur Interaktionen vieler Agenten – also Individuen, Unternehmen oder Organisationen – dienen (Mayntz 1991, S. 63 f.). Der Nachteil der Eingeschränktheit der Modelle auf Prozesse kollektiven Verhaltens besteht nach Mayntz zum einen darin, dass sich im sozialen Bereich die Regeln, an denen sich die Akteure orientieren, aufgrund von Lernverhalten ändern und dies von den Modellen nicht berücksichtigt werden könne. Zum anderen gehen Agent-Based-Modelle von der Startbedingung einer Vielzahl einzelner Agenten aus. Die vielfältigen Interaktionen von unterschiedlichen organisationalen Ebenen institutioneller Strukturen zueinander können daher nicht modelliert werden. Der Bottom-Up-Ansatz der komplexitätstheoretischen Simulationen sei blind für Wirkungen kollektiver Zielsetzungen, kritisiert Mayntz. Da es sich bei diesen kollektiven Zielsetzungen um Phänomene handelt, die im Sinne einer *downward causation* das Handeln der einzelnen Akteure bestimmen, plädiert Mayntz für die Existenz starker Emergenz in der Gesellschaft (Mayntz 2019).

Niklas Luhmann

Niklas Luhmann hat unabhängig von diesen naturwissenschaftlichen Entwicklungen ähnliche Grundüberlegungen entwickelt, also dass komplexe Systeme sehr dynamisch und kreativ sind, weil sich aus dieser Dynamik heraus neuartige Strukturen entwickeln können. Luhmann hatte aber sehr stark die Kybernetik zweiter Ordnung rezipiert, die Ende der 1960er und 1970er Jahre einen ähnlichen Paradigmenwechsel darstellte wie die Entwicklungen der Chaos- und Komplexitätstheorie in den Naturwissenschaften zur gleichen Zeit.

Der Philosoph Gotthard Günther hatte bereits in den 1950ern gezeigt, dass der Zentralbegriff der älteren Kybernetik, das Feedback oder die Rückkopplungsschleife, eine logische Herausforderung darstellt. Wie das Lügner-Paradoxon zeigt, führen Selbstbezüglichkeiten in Paradoxien. In einer Arbeit von 1962 bezieht sich Günther auf das Konzept der Selbstorganisation von Heinz von Foerster (Günther 1976, S. 17). Auch von Foerster bezieht sich anerkennend auf die logischen Neuansätze von Günther (Foerster und Pörksen 1998, S. 120). Auch die Logik der Form von George Spencer-Brown ist durch die Reflexion auf das zentrale Problem der Rückkopplung oder Selbstbezüglichkeit, des Re-Entry, geprägt. Heinz von Foerster hatte 1960 einen Artikel veröffentlicht mit dem Titel „Über selbst-organisierende Systeme und ihre Umwelten“, der auf einem Vortrag von 1959 in Chicago beruhte. Selbstorganisation als zentrales Merkmal komplexer Systeme stellt eine weitere Variante der Selbstbezüglichkeit, des Re-Entry dar. Mathematisch betrachtet führen Selbstbezüglichkeiten zu einer Entlinearisierung (Füllsack 2011, S. 69). Oder anders gesagt, komplexe, nicht-lineare Systeme sind immer durch Selbstbezüglichkeiten bestimmt.

Aufgrund der Prägung durch diesen logischen Diskurs der Kybernetik zweiter Ordnung konzipierte Niklas Luhmann soziale Systeme mit Betonung auf das Nicht-Berechenbare, das Überraschende und Kreative. Soziale Systeme sind für Luhmann nicht nur der komplexe Zusammenhang gegebener Elemente, wie es sich die Kybernetik erster Ordnung vorstellte, sondern sind durch Dynamiken und Nicht-linearitäten bestimmt.

In dem Zusammenhang mit der Fragestellung der Ad-hoc-Gruppe ist es nun interessant, zu schauen, welche Rolle der Begriff der Turbulenz im Werk von Luhmann einnimmt. In *Soziale Systeme* bringt Luhmann den Begriff der Turbulenz in Zusammenhang mit seiner Theorie der sozialen Evolution.

„Mit dieser Begriffsfassung kann man formulieren, daß eine turbulente, sich häufig und unübersehbar ändernde Umwelt höhere Anpassungsleistungen des Systems, also höhere strukturelle Flexibilität erfordere. Wenn man dann aber annehmen muß, daß die Turbulenz der Umwelt eben durch die Systeme (in der Umwelt des jeweiligen Bezugssystems) erzeugt wird, die versuchen, sich ihr anzupassen, sind Turbulenz/Flexibilitätssteigerungen zu erwarten, die zur Katastrophe führen können, – Katastrophe hier wie immer verstanden als ein anderer, schnellerer Weg zur Entropie.“ (Luhmann 1987, S. 476 f.)

Hier bezieht sich Luhmann implizit auf Ashby's Law, auf Deutsch das Gesetz der erforderlichen Vielfalt. Systeme können sich durch interne Instabilitäten stabilisieren, indem sie sich an die Instabilitäten der Umwelt anpassen. Statische Systeme können schnell aufgrund von turbulenten Einflüssen aus der Umwelt zusammenbrechen. Systeme, die interne Instabilitäten und Dynamiken aufweisen, können Störungen aus der Umwelt abfedern und kompensieren. Ashby veranschaulicht dies in seiner *Einführung in die Kybernetik* am Beispiel eines Piloten. Dieser ist während des Fluges ständig Störungen in Form von Böen und Turbulenzen ausgeliefert. Ein guter Pilot oder eine Pilotin schafft es, das Flugzeug so zu steuern, dass im besten Fall die Passagiere nichts von den Störungen mitbekommen. Dazu muss die Pilotin aber häufig gegenlenken und geschickt auf die Störungen reagieren. Das heißt, es bedarf sehr viel Dynamik,

also Gegenbewegung, damit es im Innenraum des Flugzeugs ruhig ist. „Ist er ein guter Regler, so werden die Passagiere ungeachtet irgendwelcher Böen außerhalb einen ruhigen Flug haben. Sie werden, kurz gesagt, davon abgehalten zu wissen, ob es draußen böig ist oder nicht. So dient ein guter Pilot als ‚Sperre‘ gegen die Übertragung von Information.“ (Ashby 1974, S. 289)

Demnach erfordert eine turbulente Umwelt höhere strukturelle Flexibilität der Systeme. Über den Mechanismus der dynamischen Stabilisierung können Systeme Strukturen aufbauen, die eine Reaktion auf die Umwelt darstellen. Aufgrund evolutionärer Anpassungsleistungen spiegelt sich also die Turbulenz der Umwelt in den Systemen wider. Die Turbulenz der Umwelt fungiert demnach als eine Art strukturbildende Unruhe. Jedoch befinden sich, darauf weist Luhmann hin, in der Umwelt von Systemen andere Systeme, die ihre interne Instabilität aufbauen. Auf diese Weise erhöht sich die Instabilität der Umwelt insgesamt für ein jeweiliges System und auf diese erhöhte Instabilität reagiert das System wieder durch Erhöhung der internen Instabilität. Ein Aufschaukelungsprozess wird dadurch angeregt, wodurch sich die internen Instabilitäten der Systeme wechselseitig erhöhen. Dies führt zu einer Multiplikation von Turbulenzen, was letztlich zu einer Auflösung der Systeme führen kann. Systeme müssen daher auch stabilisierende Gegenmaßnahmen gegen diese sich aufschaukelnden Instabilitäten entwickeln. Für Luhmann sind Turbulenzen also konstitutiv für die Systeme, bergen aber gleichzeitig katastrophisches Potenzial, ein Oszillieren zwischen Ordnung und Unordnung.

Fazit

Turbulenzen stellen für die Naturwissenschaften eine große Herausforderung dar. Die Geschichte der Wissenschaften zeigt, wie schwierig es überhaupt ist, komplexe und dynamische Systeme mathematisch zu fassen. Turbulenzen stellen aber nicht nur unübersichtliche Phasen der Störung und des Chaos dar, sondern bieten auch ein schöpferisches Potenzial, denn aus dem Chaos heraus können neuartige Muster und Strukturen entstehen. Das Prinzip des Order from Noise ist jedoch nicht nur in der naturwissenschaftlichen Chaos- und Komplexitätsforschung, sondern auch in der Kybernetik zweiter Ordnung ein zentrales Prinzip.

Von naturwissenschaftlicher Seite aus sind seit den 1980ern Versuche entstanden, auch soziale Systeme und ihre Turbulenzen mithilfe neuartiger Modelle beschreibbar zu machen. Diese Versuche haben in den Wirtschaftswissenschaften im Zuge der Complexity Economics interessante Ansätze entstehen lassen. Aus soziologischer Perspektive stießen jedoch komplexitätstheoretische Modelle sozialer Systeme mitunter auf Kritik. Mayntz und Luhmann übertragen nicht einfach die Forschungsergebnisse der Komplexitätsforschung auf die Soziologie, sondern die Begriffe der Komplexität und Turbulenz erfahren durch ihre Reflexion in der soziologischen Theorie eine Spezifizierung. Vor allem Luhmann schöpft aus dem Potenzial der Theorietradition der Kybernetik zweiter Ordnung und entwickelt ein Konzept von sozialer Turbulenz, das auf paradoxe Weise die Momente von Stabilisierung, Unordnung und Kreativität zusammenbringt.

Literatur

- Arthur, Brian. 2015. *Complexity and the Economy*. Oxford: Oxford University Press.
Ashby, Ross W. 1974. *Einführung in die Kybernetik*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
Briggs, John und David F. Peat. 1995. *Die Entdeckung des Chaos*. München: Dtv.

- Foerster, Heinz von und Bernhard Pörksen. 1998. *Wahrheit ist die Erfindung eines Lügners. Gespräche für Skeptiker*. Heidelberg: Carl Auer Verlag.
- Füllsack, Manfred. 2011. *Gleichzeitige Ungleichzeitigkeiten. Einführung in die Komplexitätsforschung*. Wiesbaden: Springer.
- Günther, Gotthard. 1976. Das metaphysische Problem einer Formalisierung der transzendental-dialektischen Logik. 1962. In *Gotthard Günther. Beiträge zur Grundlegung einer operationsfähigen Dialektik*, 189–248. Hamburg: Meiner.
- Luhmann, Niklas. 1987. *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Mayntz, Renate. 1991. Naturwissenschaftliche Modelle, soziologische Theorie und das Mikro-Makro-Problem. In *Die Modernisierung moderner Gesellschaften. Verhandlungen des 25. Deutschen Soziologentages in Frankfurt am Main 1990*, Hrsg. Wolfgang Zapf, 55–58. Frankfurt am Main: Campus Verlag.
- Mayntz, Renate. 2019. Emergenz in Philosophie und Sozialtheorie. In *Emergenz. Zur Analyse und Erklärung komplexer Strukturen*, Hrsg. Jens Greve und Anette Schnabel, 156–186. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Paslack, Rainer. 1991. *Urgeschichte der Selbstorganisation. Zur Archäologie eines wissenschaftlichen Paradigmas*. Wiesbaden: Springer.
- Prigogine, Ilya. 1998. *Die Gesetze des Chaos*. Frankfurt am Main: Insel-Verlag.
- Squazzoni, Flaminio. 2012. *Agent-Based Computational Sociology*. Sussex: Wiley.
- Waldrop, Mitchell M. 1992. *Complexity. The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos*. New York: Touchstone.