

Die kausale Mechanistik der Prognosen aus dem Computer

Gabriele Gramelsberger

Seit den 1980er Jahren beschäftigen Prognosen zum anthropogenen Klimawandel Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit gleichermaßen.¹ Von der übertriebenen Gelassenheit der Klimaskeptiker bis zur Hysterie der Alarmisten basieren die Expertisen dabei auf den Prognosen computerbasierter Modelle zur Berechnung zukünftiger Szenarien. Die Heterogenität der Expertisen spiegelt sich in den kontroversen Diskussionen zum Klimawandel wider und kumuliert meist in der Rede von der Unsicherheit der Prognosen. Dies stellt zunehmend den Anspruch wissenschaftlicher Expertise in Frage. Vom Verlust des öffentlichen Vertrauens in die Wissenschaft wird gesprochen und von der Beliebigkeit der Expertisen und Prognosen.² Dabei wird gerne übersehen, dass sich die Logik berechneter Prognosen computerbasierter Modelle nur schwer mit den sozio-politischen Anforderungen nach gesellschaftlich relevanten Aussagen und handlungsleitenden Empfehlungen vereinbaren lassen. Der Grund hierfür liegt in der Wissenschaftstradition, in welcher die Computermodelle angesiedelt sind. Insbesondere die aktuellen Klimamodelle sind in direkter Linie mit Isaac Newtons deterministischer Konzeption der Natur verknüpft. Die kausale Mechanistik dieser Konzeption propagiert eine mathematisierte Welt, in welche sich nicht-physikalische Aspekte allenfalls in reduzierter Weise integrieren lassen. Dies bedeutet, dass die im Anklang an die Atmosphäre so genannte Anthroposphäre, also die Sphäre menschlichen Einwirkens und Handelns, lediglich als Effekt auf phy-

1 Vgl. Weingart, *Von der Hypothese*.

2 »Die Vorstellungen über die Wissenschaft haben sich offenbar gewandelt. Sie ist nicht mehr das unantastbare Heiligtum einer fortschrittsgläubigen Gesellschaft [...], sondern sie wird in der öffentlichen Wahrnehmung als mitverantwortlich gesehen für den Schock, den die Gesellschaft seit den siebziger Jahren angesichts von Umwelt- und Klimaproblem wie auch der technologischen Risiken zu verkraften hat. Wesentliche Einbußen hat das öffentliche Vertrauen in die Wissenschaft auch durch die tägliche Erfahrung des Expertenstreits erlitten, der die Hilflosigkeit gegenüber der sogenannten Nebenfolgenproblematik demonstriert.« Frederichs, »Wandel«, S. 17.

sikalische Aspekte im Modell berücksichtigt ist. Oder in anderen Worten: Menschen und ihre zivilisatorischen Errungenschaften fungieren in Klimamodellen beispielsweise als global gemittelte Kohlendioxid-Quellen, deren Einfluss auf die Veränderung des Systems als Gradient in die Zukunft extrapoliert wird. Doch aus diesem Gradienten, üblicherweise als prognostische Entwicklung der globalen Erwärmung von etwa zwei Grad Celsius bis 2100 angegeben,³ lassen sich keine direkten, handlungsleitenden Empfehlungen ableiten. Denn die Natur der Zahlen besteht gerade in ihrer Referenzlosigkeit zu interpretativ-semantischen Kontexten. Wissenschaftliche Prognosen beziehen sich daher auf andere Gradienten und Zahlen, gemessen in Experimenten oder Beobachtungen.

Um dennoch handlungsleitende Empfehlungen aus Berechnungen mit Computermodellen ableiten zu können – also jene Art wissenschaftlicher Expertise betreiben zu können, wie es sich Politik und Öffentlichkeit wünschen –, müssen Wissenschaftler ihre mathematischen Modelle mit semantischen Kontexten außerhalb quantifizierbarer Bereiche verknüpfen. Doch dies kann nur interpretativ geschehen und konfiguriert mit dem an berechnete Zahlen gestellten und, wie zu zeigen sein wird, überholten Anspruch der Exaktheit. Dieser Konflikt ist es, der sich maßgeblich in den kontroversen Diskussionen um den anthropogenen Klimawandel entfaltet, da einerseits Exaktheit erwartet, andererseits Unsicherheit beklagt und zur Ursache für Handlungsunfähigkeit deklariert wird. Da Wissenschaft jedoch zunehmend in der Pflicht steht, berechnete Vorhersagen zukünftiger Entwicklungen als Grundlage für sozio-politische Entscheidungen zu liefern, weitet sich dieser Konflikt aktuell zur Nagelprobe für Wissenschaft und Wissenschaftlichkeit aus, vor allem aus der Perspektive von Politik und Öffentlichkeit.⁴ Vor diesem Hintergrund der Erwartungen an und der tatsächlichen Leistungsfähigkeit von wissenschaftlichen Expertisen, basierend auf Berechnungen, scheint ein Überdenken des Anspruches, Zukunft vorhersagen zu können, angebracht. Anhand aktueller Klimamodelle lässt sich ein Einblick in die Logik dieser Berechnungsmodelle und dem damit einhergehenden Blick der Wis-

3 Der Gradient drückt die Änderung einer atmosphärischen Größe aus, beispielsweise die Zunahme der Temperatur von heute bis 2100. Welche Ursachen diese Zunahme hat, will man mit den Modellen herausfinden. Vgl. IPCC, *Climate Change*, insb. S. 5.

4 Beispielsweise in der These einer ›post-normal science‹, die einen grundlegenden Wandel der Wissenschaft und ihrer Expertise fordert, welcher dem inhärenten Unsicherheitspotenzial aktueller Problemstellungen Rechnung tragen soll und die Formel hervorbrachte, »Facts are uncertain, values in dispute, stakes high and decisions urgent.« Vgl. Funtowicz/Ravetz, »Science«.

senschaft auf die heutige wie zukünftige Welt gewinnen. Dabei zeigt sich, dass die in der Computerprognostik implementierte kausale Mechanistik ein Systemverständnis in sich birgt, das erst durch die computerbasierten Modelle praktische Relevanz gewinnt. Mit der verstärkten Nutzung der Computer ab Mitte der 1960er Jahre wurde dieses Systemverständnis in die Öffentlichkeit transportiert und mit ihm die Hoffnung, Zukunftsprognosen in großem Stil erstellen zu können. Daher ist es das Anliegen des vorliegenden Beitrages nicht nur den Anspruch von berechneten Zukunftsprognosen zu hinterfragen, sondern auch die wissenschaftliche Tradition zu beleuchten, in welcher dieser Anspruch verortet ist.

Berechenbarkeit als wissenschaftliche Form der Realitätserkenntnis

Aus der Perspektive von Politik und Öffentlichkeit wird zumeist unterschätzt, dass moderne Naturwissenschaft fast ausschließlich auf der Grundlage quantifizierbarer und mathematisierbarer Prämissen operiert. Diese Mathematisierung wissenschaftlicher Erkenntnisproduktion setzte mit dem Beginn neuzeitlicher Wissenschaft und ihrer Paradedisziplin, der Mechanik ein, und entfernt seither wissenschaftliches und lebensweltliches Weltverständnis in zunehmendem Maße voneinander. Dabei hat sich nicht nur die Verfassung wissenschaftlicher Erkenntnis grundlegend verändert, sondern auch ihr Evidenzkriterium und ihre Reichweite. Das Credo neuzeitlicher und moderner Naturwissenschaft lautet: Als wahr gilt, was berechenbar ist, und darüber hinaus lässt sich alles, was berechenbar ist, in die Zukunft extrapolieren. Mit dem französischen Mathematiker Henri Poincaré gesprochen: »Wir [Mathematiker und Naturwissenschaftler] sind daran gewöhnt zu extrapolieren; das ist ein Mittel, die Zukunft aus der Vergangenheit und aus der Gegenwart abzuleiten.«⁵ Doch diese berechnete Ableitung der Zukunft aus Gegenwart und Vergangenheit hat einen entscheidenden Haken. Sie ist nur für sehr einfache, idealisierte Sachverhalte in exakter Weise möglich. Je verwickelter und komplexer die Sachverhalte sind, die untersucht werden sollen, desto schwieriger wird es, mathematische Extrapolationen in die Zukunft zu generieren. Eigentlich ist es prinzipiell gesehen unmöglich, unter

⁵ Poincaré, *Wissenschaft*, S. 17.

diesen Umständen Vorhersagen zu treffen, was jedoch weder Politiker noch Wissenschaftler davon abhält, Prognosen einzufordern beziehungsweise zu erstellen. Wie kann das sein?

Die Antwort ist in einem Verständnis von Wissenschaft zu finden, das seit gut hundert Jahren überholt ist. Dieses Wissenschaftsverständnis hat seinen Ursprung in dem Erfolg der neuzeitlichen Physik und deren mathematischer Konzeption. Dieser Erfolg generierte sich aus zwei maßgeblichen Entwicklungen: Zum einen aus der Entwicklung einer physikalischen Theorie der Bewegung, zum anderen aus der symbolischen Handhabarmachung von Bewegung mit Hilfe der Mathematik. Ersteres kumulierte 1687 in Isaac Newtons Mechanik, letzteres in der Entwicklung des Differentialkalküls und der Differentialrechnung (Analysis) durch Isaac Newton, Gottfried Wilhelm Leibniz und andere Mathematiker des 17. und 18. Jahrhunderts.⁶ Im Laufe der Zeit wurde die physikalische Theorie der Bewegung mit der Berechenbarkeit von Bewegung identisch und in Form mathematisch-deterministischer Modellierungen praktikabel.⁷ Der entscheidende Vorteil solcher deterministischen Modelle ist es, die raum-zeitliche Entwicklung eines Systems darstellen zu können, insofern die Entwicklung als Bewegung mit Hilfe des Differenzialkalküls mathematisch fassbar wird. Ganz im Sinne Newtons werden bis heute die physikalischen Phänomene des Mesokosmos in dieser Weise dargestellt und erforscht. »Die ganze Schwierigkeit der Philosophie,« schrieb Newton und meinte damit die Naturphilosophie beziehungsweise Physik der damaligen Zeit, »muss wohl darin gesehen werden, dass man von den Bewegungsphänomenen her die Kräfte der Natur herausbekommt, und dann von diesen Kräften die übrigen Phänomene ableitet.«⁸ Konkret bedeutet dies, dass deterministische Modelle, wie beispielsweise aktuelle Wetter- und Klimamodelle, auf Differentialgleichungen basieren, welche nichts anderes darstellen als Bewegungsbahnen von Fluiden, so genann-

6 Newton, *Philosophiae*; ders., »De methodis«; Leibniz, »Novae methodus«.

7 Mit der Quantenmechanik, der Relativitätstheorie sowie der Wahrscheinlichkeitsrechnung kamen im Laufe des 19. und 20. Jahrhunderts weitere physikalische Theorien und Darstellungsweisen hinzu und eröffneten einen adäquaten Zugang zu Mikro- und Makrokosmos. Für Klimamodelle sind jedoch die klassischen, deterministischen Modelle von Bedeutung, die mesokosmische Phänomene auf der Basis von Dynamik beschreiben. In deterministischen Modellen leitet sich der Endzustand des Systems zwingend aus dem Anfangszustand des Systems auf Basis definierter Regeln, beispielsweise notiert als Differentialgleichungen, ab.

8 Newton, »Principia«, S. 246.

te Trajektorien.⁹ In solchen Modellen ist alles in Bewegung und in seiner Veränderung voneinander abhängig, oder anders gewendet: Ein deterministisches Modell ist ein ›numerisches Mobile‹ veränderlicher, messbarer Größen, die miteinander interagieren. Je nach Anstoß dieses numerischen Mobiles – in der Regel durch Messdaten initialisiert – verändert sich sein Bewegungsverhalten immer wieder neu, obwohl die Elemente des Modells immer dieselben sind. Dieses Bewegungsverhalten lässt sich mit Hilfe von Computern als Bewegungstrajektorien berechnen und durch Extrapolation in die Zukunft verlängern. Daraus ergeben sich dann die Prognosen zukünftiger Zustände des Systems.

Der entscheidende Punkt bezüglich der Berechenbarkeit eines Modellverhaltens liegt in der Komplexität des Modells. Als Newton seine Theorie der Bewegung entwickelte, hatte er keine komplexen Systeme, wie Wetter oder Klima, vor Augen, welche das Bewegungsverhalten hunderter oder tausender Fluide beschreiben, sondern die in seiner Himmelsmechanik idealisierten Bewegungen des Planetensystems. Bereits 1609 gelang es Johannes Kepler anhand eines einfachen mathematischen Modells, das er aus akribischen Beobachtungen gewonnen hatte, die Bahn zweier Planeten zueinander zu berechnen und damit vorherzusagen. Dies stellte den Auftakt des ›physico-mathematischen‹ Wissenschaftsverständnisses dar, dem mit Newtons Mechanik der Durchbruch gelang und dessen Wirksamkeit sich gut 200 Jahre nach Kepler eindrucksvoll bestätigte. Als der französische Mathematiker Urban Le Verrier 1848 den Planeten Neptun entdeckte, geschah dies rein auf dem Papier auf Basis von Berechnungen. Le Verrier hatte die Bahn des Uranus unter der Annahme des Einflusses eines bis dahin unentdeckten Planeten per Hand berechnet und konnte so die vermeintliche Position des Neptun bestimmen. Als er seine Prognose an das Berliner Observatorium schickte, wurde in der darauf folgenden Nacht der Planet Neptun von dem Astronom Johann Galle aufgespürt. Was Astronomen seit Galileo Galilei nicht durch ihre Teleskope gesehen hatten, zeigte sich Le Verrier auf dem Papier in Form von Zahlen. Dieser Erfolg verfestigte das naturwissenschaftliche Selbstvertrauen in die Beschreibung- und Vorhersagbarkeit natürlicher Phänomene mit Hilfe mathematisierter Theorien und Modelle.

Da Mathematisierung in der Regel mit Quantifizierung einhergeht, etablierte sich parallel dazu eine vielfältige Infrastruktur von Experiment- und Messeinrichtungen, welche die im Modell berechneten Größen zunehmend

⁹ Fluide sind masselose Teilchen, auf welche – ganz im Sinne Newtons – Bewegungskräfte wirken, die wiederum zu physikalischen Effekten führen.

präziser messbar machte. Die Folge war Mitte des 19. Jahrhunderts die Zuspitzung der physico-mathematischen Forschungslogik im hypothetisch-deduktiven Forschungsstil der modernen Physik und Ingenieurwissenschaften. Dieser Forschungsstil prägt die Naturwissenschaften bis heute und setzt Experimentalforschung mit Präzisionsmessung gleich. An die Stelle experimentellen Gelingens oder Fehlschlagens treten immer umfangreichere Fluten von Messdaten.¹⁰ Berechnete Prognosen einerseits und Experimente als Präzisionsmessungen andererseits verzahnen sich dabei zu einem eng verknüpften Forschungsprozess. In diesem Forschungsprozess kommt der Prognose eine Schlüsselrolle zu. Auf Basis mathematischer Extrapolation werden Vorhersagen getroffen, die dann mit Hilfe experimenteller Präzisionsmessungen überprüft werden, welche die der Prognose zugrunde liegenden Annahmen bestätigen oder widerlegen. Da dies für die Vorhersage des zukünftigen Klimawandels nicht möglich ist, da die zukünftige Entwicklung so bald nicht messbar sein wird, sind die von Politik und Öffentlichkeit geforderten Prognosen im Grunde nicht wissenschaftlich. Klimaforscher sprechen daher ungern von Vorhersagen oder Prognosen, sondern von Trends und Szenarien.

Nichtsdestotrotz liefert die Wissenschaft solche Trends, die dann als Prognosen zukünftiger Entwicklungen diskutiert werden. Die Problematik verschärft sich noch durch die gesellschaftliche Erwartung an Wissenschaft als ›exakte‹ Wissenschaft. Dieses Wissenschaftsverständnis hat sich im 19. Jahrhundert vor dem skizzierten Hintergrund und den Erfolgen der Physik gesellschaftlich etabliert und dokumentiert, wie sehr »die Realität, die die Physik beschreibt, zur Realität der technologischen Gesellschaft geworden [ist].«¹¹ ›Exakt‹ bedeutet jedoch aus wissenschaftsinterner Sicht, dass Wissenschaft »allenthalben mit Maß und Zahl« rechnet.¹² Dieses Rechnen mit Maß und Zahl muss nicht exakt sein. Tatsächlich sind Messungen immer mit Fehlern behaftet und daher ungenau. Doch außerhalb der Wissenschaften geht der Begriff der Exaktheit mit konkreten Erwartungen an eindeutige – sprich: sichere – Prognosen und Aussagen einher. Die ›Realität der Physik‹ hat jedoch in den letzten hundert Jahren eine grundlegende Verän-

¹⁰ Vgl. Stichweh, *Zur Entstehung*.

¹¹ »Das physikalische Weltbild ist das Weltbild dieser Gesellschaft. Kein Wunder also, dass die physikalische Erkenntnis zum Ideal von Erkenntnis überhaupt werden konnte, denn diese Art der instrumentellen Beobachtung von Realität fügt sich passgenau in ein Selbstbild der Gesellschaft, das wesentlich durch eben diese Beobachtungsweise erst entstanden ist.« Frederichs, »Wandel«, S. 21.

¹² Planck, *Sinn*, S. 5.

derung durchlaufen, welche bis heute nicht wirklich in der Gesellschaft angekommen ist. Diese Veränderung meint nicht die Revolution der Physik durch die Relativitätstheorie und die Quantenmechanik, sondern die Aufweichung des Exaktheitsanspruches für die Berechnung der Entwicklung komplexer Systeme. Nahezu jede wissenschaftliche Anwendung wie auch Prognose ist davon betroffen, sei es die Wetter- oder Klimavorhersage, die Berechnung des Strömungsverhaltens von Flugzeugen oder der Vorgänge in Zellen.

Prognose im Spannungsfeld von Approximation und Extrapolation

Der Begriff und die mathematische Praxis, durch die die Naturwissenschaft seit gut einhundert Jahren beherrscht werden, lautet Approximation. Hinter diesem Begriff verbirgt sich eine methodologische Revolution der ›exakten‹ Wissenschaft aus Gründen der Notwendigkeit und Pragmatik. Denn Ende des 19. Jahrhunderts zeigte sich, dass die Analysis – die Analyse der Entwicklung von Systemen auf Basis von Differentialgleichungen – an ihre Grenzen gestoßen war. War es Kepler, Newton und anderen Forschern gelungen, einfache und stark idealisierte Systeme mathematisch-analytisch zu behandeln, das heißt die systembeschreibenden Differentialgleichungen so umzuformen, dass sie eine exakte Lösung, welche das Verhalten des Systems darstellt, erhielten, so forderte die rasche Entwicklung von Technik und Wissenschaft im 19. Jahrhundert die Beherrschung zunehmend komplexerer und damit realitätsnäherer Systeme. Für komplexere Systeme lässt sich jedoch analytisch keine Lösung herleiten. Man kann bis heute diese Systeme zwar mit Differenzialgleichungen beschreiben, aber die exakte Lösung, welche das Verhalten angibt, kennt man nicht. Die analytische Ableitung ist schlichtweg nicht durchführbar, da zu komplex.¹³ Die Folge dieser Limitierung der

13 Die Komplexität rührt dabei aus nicht-linearen Rückkopplungen zwischen drei oder mehr Elementen eines Systems. Einfache Systeme bestehen zumeist aus zwei Elementen, beispielsweise das bekannte Zwei-Körper-System der Himmelsmechanik, in welchem zwei Körper linear aufeinander wechselwirken. Doch schon der Einfluss eines dritten Körpers kann alles durcheinander bringen und damit das Verhalten des Systems unvorhersagbar machen. Für ein solches System lässt sich analytisch keine Lösung mehr formulieren, welche das Verhalten darstellen würde. Diese ›Entdeckung‹ führte im 19. Jahrhundert zu der Panik, dass sich unser Planetensystem als Mehr-Körper-System unter bestimmten Um-

Analysis auf einfache, stark idealisierte Systeme war die Stagnation von Wissenschaft und Technik in fast allen Bereichen. Der Traum neuzeitlicher Naturwissenschaft, alles berechnen und vorhersagen zu können, wie ihn Pierre Simon de Laplace 1814 noch paradigmatisch formulierte, drohte zu scheitern.¹⁴

Ein typisches Beispiel dieser Situation liefert die Strömungsdynamik jener Tage, welche sich in die rein theoretische Disziplin der Hydrodynamik und die angewandte Disziplin der Hydraulik aufteilte. Während die Hydraulik empirische Lösungen – heute würden wir Expertisen sagen – für Einzelprobleme suchte, welche beispielsweise bei der Konstruktion von Bewässerungsanlagen gefragt waren, lieferte die Hydrodynamik allgemeine Lösungen für stark idealisierte Systeme. Basierend auf Newtons zweitem Axiom hatte 1755 der Schweizer Mathematiker Leonhard Euler die grundlegenden Bewegungsgleichungen formuliert. Dabei setzte er idealisierte Fluide voraus, für die weder Reibung noch Kompressibilität existieren. Ohne Reibung lassen sich jedoch keine realistischen Strömungsphänomene wie Wirbelbildung und Turbulenz erfassen. Zwar postulierte hundert Jahre später der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz, dass auch in idealisierten Fluiden Wirbel existieren können. Doch sie mussten als vorhanden angenommen werden und konnten weder vergehen, noch entstehen.¹⁵ Die zunehmende Bedeutung technischer Entwicklungen, vor allem in der Luftfahrt, und das Problem der Turbulenz vergrößerte die Spaltung zwischen Theorie und experimenteller Forschung. Die Anwendungsforscher waren gezwungen, das Dilemma durch experimentell gewonnene Gleichungen und Koeffizienten zu überbrücken. Sie mussten mit »Experimenten rechnen«, wollten sie neue

ständen nicht stabil verhalten könnte. Dies zeigt, wie sehr diese mathematische Entdeckung Wissenschaft wie Gesellschaft in ihrem Glauben an Exaktheit und Vorheberechenbarkeit erschütterte.

14 »Wir müssen also den gegenwärtigen Zustand des Weltalls als die Wirkung seines früheren Zustandes und andererseits als die Ursache dessen, der folgen wird, betrachten. Eine Intelligenz, welche für einen gegebenen Augenblick alle Kräfte, von denen die Natur belebt ist, sowie die gegenseitige Lage der Wesen, die sie zusammen setzen, kennen würde, und überdies umfassend genug wäre, um diese gegebenen Größen einer Analyse zu unterwerfen, würde in derselben Formel die Bewegungen der größten Weltkörper wie die des leichtesten Atoms ausdrücken: nichts würde für sie ungewiss sein und Zukunft wie Vergangenheit ihr offen vor Augen liegen.« Laplace, *Philosophischer Versuch*, Einleitung.

15 Dieses Postulat führte zur heute eigenartig anmutenden Schlussfolgerung, dass Wirbel in universalen Fluiden wie dem Äther »as permanent as the solid hard atoms assumed by Lucretius, [as] Kelvin wrote to Helmholtz in a letter in 1867« seien. Eckert, *The Dawn*, S. 20.

und dringend benötigte Erkenntnisse gewinnen, auch wenn diese nur eine eingeschränkte Reichweite besaßen. »In 1896 a textbook on ballistics lists in chronological order 20 different ›laws of air resistance,‹ each one further divided into various formulae for different ranges of velocity. [...] No physical theory could provide a logical framework for justifying these empirical ›laws.«¹⁶ Der Nachteil dieser spezifischen Gleichungen in Form empirischer, also analoger Berechnungen lag in ihrer Beschränkung auf die analysierten Fallstudien.¹⁷

Diese Situation verdeutlicht die Notlage der Naturwissenschaft des ausgehenden 19. Jahrhunderts. Entweder konnte man einfache, aber stark idealisierte Systeme ohne praktischen Nutzen analytisch behandeln und vorher-sagen oder man musste experimentelle Lösungen für konkrete Einzelfälle nach dem Motto ›trial and error‹ finden. Vor diesem Hintergrund zeichnete sich ein Ausweg aus dem Dilemma ab, dessen Wirkungsmacht sich jedoch erst mit der Entwicklung der Computer entfaltete. Denn die eigentliche Alternative zur analytischen Herleitung der Lösung war weniger das Experiment, als deren numerische Approximation. Indem man die Differenzialgleichungen nicht zu einer exakten Lösung, die für das gesamte Raum-Zeit-Kontinuum Gültigkeit besitzt, umzuformen versuchte, sondern direkt konkrete Zahlwerte in die Gleichung einsetzte, konnte man sie für ein diskretes Raum-Zeit-Gitter berechnen. Die solchermaßen berechneten Gleichungen stellen zwar keine exakte allgemeine Lösung dar, sondern lediglich eine näherungsweise Lösung, also Approximation an die zumeist unbekannte exakte Lösung. Doch damit wurde es möglich, auch komplexere Systeme näherungsweise zu berechnen, wie eben heutzutage das Wetter oder Klima. Diese Methode – numerische Simulation genannt, da die numerische Approximation die unbekannte exakte und allgemeine Lösung ›simuliert‹ – lässt sich per Hand auf Papier ausführen oder durch Computer automatisieren.¹⁸ Da für eine hinreichend aussagekräftige Simulation jedoch genügend Raum-Zeit-Punkte berechnet werden müssen, das Berechnungsgitter also möglichst fein aufgelöst sein sollte, überstieg diese Methode bald die Kapazitäten manueller Berechenbarkeit. Mit der numerischen Methode bot sich zwar ein Ausweg an, doch die Praktikabilität erforderte die Automatisierung des

¹⁶ Eckert, *The Dawn*, hier S. 26.

¹⁷ Vgl. Gramelsberger, *Computerexperimente*.

¹⁸ Die mathematische Grundannahme ist: Je feiner das Berechnungsgitter gewählt wird, desto näher wird die diskrete Lösung der exakten Lösung kommen. Simulationen sind daher von der Auflösung der Berechnungen und den dafür zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten abhängig.

Rechnens mit Hilfe von Maschinen. Dies sollte jedoch nicht vor Mitte des 20. Jahrhunderts geschehen.

Doch auch mit Hilfe automatischer Rechner bleibt die numerische Simulation ein approximatives Verfahren. Es erlaubt zwar die Berechnung der Trajektorien eines Systems sowie diese in die Zukunft zu extrapolieren, doch die so berechnete Prognose steht im Spannungsfeld von Approximation und Extrapolation. Sie stellt immer nur eine mögliche Vorhersage auf Basis der vorgegebenen Anfangs- und Randwerte dar.¹⁹ Ob die Vorhersage mathematisch korrekt ist, lässt sich in den meisten Fällen nicht beweisen. Man muss darauf ›hoffen‹, dass die approximierte Lösung richtig ist und gegen die exakte, aber unbekannte Lösung konvergiert.²⁰ Wie weit man dabei von der exakten, unbekanntenen Lösung entfernt ist, lässt sich ebenfalls nicht beweisen. Mit anderen Worten: Mit numerischen Simulationen berechnete Prognosen sind nicht nur approximativ, sondern bergen durch ihre Methode bedingt ein prinzipielles Unsicherheitspotenzial in sich. Fast alle aktuellen naturwissenschaftlichen Prognosen sind durch diese Eigenschaften charakterisiert. Hinzu kommt, dass die Wahl der Anfangs- und Randbedingungen weitere Unsicherheitsfaktoren mit sich führt, wie das Beispiel der Klimamodellierung zeigen wird.

Konvergenz von Modell und Computer

Die numerische Simulation ist als Methode seit dem 18. Jahrhundert bekannt. 1759 wurde sie von dem französischen Mathematiker Joseph Luis Lagrange als so genannte Differenzenmethode erstmals beschrieben und seither kontinuierlich weiterentwickelt. Um jedoch praktische Relevanz zu entfalten, bedurfte es der Automatisierung des Rechnens. Vor der Entwicklung der elektronischen Computer bedeutete dies, dass ›menschliche Computer‹ per Hand, mit Hilfe mechanischer Addiermaschinen, tagaus tagein stupide

19 Die Anfangswerte sorgen für die Initialisierung der Berechnung, meist nutzt man hierfür Messwerte. Die Randwerte geben die konkreten Bedingungen an, unter welchen die Simulation durchgeführt wird, beispielsweise wie groß und hoch aufgelöst das räumliche Berechnungsgitter ist und was mit Berechnungsdaten am Gitterrand geschieht.

20 Diese ›Hoffnung‹ wird durch numerische Tests untermauert, welche die Stabilität einer approximativen Lösung testen. Verhält sich ein Ergebnis stabil, kann man davon ausgehen, dass es gegen die exakte Lösung konvergiert. Ein Beweis ist dieser Konvergenztest jedoch nicht, d.h. die angewandte Mathematik gebt sich hier auf unsicheres Terrain.

Berechnungen ausführen mussten. Ganze Rechenäle wurden ab Mitte des 19. Jahrhunderts für die ballistischen Berechnungen des Militärs, für die Gezeitenberechnung der Schifffahrt oder die Kalkulationen der Versicherungsbranche eingerichtet. Heute sind vor allem die weiblichen Computer der Moore School of Engineering der Universität von Pennsylvania bekannt, die während des Zweiten Weltkriegs Tabellen für Raketenbahnen berechneten.²¹ Es ist derselbe Ort, an welchem 1946 unter der Mitwirkung von John von Neumann der Electronic Numerical Integrator and Computer (ENIAC), einer der ersten elektronischen Computer gebaut wurde. Diese Koinzidenz ist nicht ganz zufällig, denn es lag im wirtschaftlichen wie mathematisch-wissenschaftlichen Interesse, Berechnungen mit elektronischen Rechenmaschinen zu automatisieren. Selbst ganze Säle voller menschlicher Computer konnten nur magere Resultate liefern angesichts der benötigten Quantität an Berechnungen für tragfähige Aussagen. So demonstrierte John von Neumann, ein ungarisch-amerikanischer Mathematiker und Pionier der Computerentwicklung der 1940er Jahre, dass die Berechnung einer einzigen Trajektorie einer ballistischen Simulation 750 Operationen benötigt.²² Per Hand bedeutete dies über sieben Stunden Rechenzeit. ENIAC konnte eine solche Trajektorie bereits in zwei Sekunden berechnen und heutige Supercomputer würden dafür 1,5 Pikosekunden benötigen. Doch eine raum-zeitliche ballistische Berechnung, wie sie von John von Neumann in Los Alamos für die Ausbreitung der Druckwelle der Wasserstoffbombe per Hand berechnet werden sollte, basiert auf der Berechnung von rund 165.000 Trajektorien, also auf über 124 Millionen Operationen. Dies würde per Hand gut 130 Jahre Rechenzeit erfordern, während ENIAC in 4,3 Tagen damit fertig war. Ein heutiger Supercomputer bräuchte in etwa 0,25 Mikrosekunden dafür. Dieser Vergleich zeigt, dass Rechenkraft zu einer entscheidenden Ressource der Wissenschaft des 20. Jahrhunderts wurde und bis heute ist. Die Anstrengungen Computer zu bauen gründen in dem Bemühen die Limitierung der Analysis und damit die Stagnation von Wissenschaft und Technik durch numerische Simulationen zu überwinden. Bis heute treibt dies die Entwicklung der Supercomputer an.²³

21 Grier, *When Computers*.

22 Vgl. Goldstine/Von Neumann, »On the Principles«.

23 Der schnellste Supercomputer des Jahres 2009, Roadrunner von IBM, ein Cluster von 129.600 Prozessoren, führt über 1.105 Billionen Operationen pro Sekunde aus. In der TOP500 Liste werden alle sechs Monate die weltweit schnellsten Rechner aufgelistet. Vgl. <http://www.top500.org>, Juni 2009 (Abruf: 17.07.2009).

Die Entwicklung der Computer macht es möglich, mathematische Modelle realweltlicher Systeme numerisch zu realisieren. Mit steigender Rechenkraft, werden diese Modelle zunehmend ›realitätsnäher‹, insofern immer weniger Idealisierungen nötig sind. Zudem hat sich die Dichte der Berechnungen exponentiell erhöht, so dass aus anfänglichen Graphen einzelner Trajektorien nun dreidimensionale Bilder tausender Trajektorien werden. Diese Konvergenz von Modell und Computer hat nicht nur die Spaltung von Theorie und Anwendung in der Wissenschaft überwunden. Sie hat der Wissenschaft auch zwei neue Betätigungsfelder beschert: Nämlich, unter den genannten Einschränkungen, Zukunftsprognosen in großem Stil zu erstellen und darüber hinaus Natur ›optimieren‹ zu können. Mathematische Extrapolationen auf Basis von Modellen werden nicht nur für die Prognose zukünftiger Entwicklungen eingesetzt, sie dienen auch der Optimierung von Systemen, vor allem in der Technik, der Materialforschung oder der Biologie. Denn die Trajektorien eines Systems lassen sich nicht nur in die Zukunft fortschreiben, sie lassen sich ebenso numerisch in neue Bereiche vorantreiben. Tatsächlich untersuchen Wissenschaftler mit Hilfe von numerischen Simulationen den Lösungsraum eines Systems. Ob dieser Lösungsraum in die Zukunft ausgedehnt wird oder in neue, bislang unerforschte Bereiche, macht mathematisch gesehen wenig Unterschied. Dies zeigt, wie abstrakt und fern unseres Alltagsverständnisses Computermodelle sind und die Forschung mit ihnen.

Kausale Mechanistik der Klimamodelle – Ein Fallbeispiel

Ganz im Sinne Newtons werden mit Klimamodellen die Bewegungskräfte, welche auf die simulierten Fluide wirken, untersucht. Welche physikalischen Effekte dies dann zur Folge hat, ist Teil der wissenschaftlichen Interpretation der Simulationsresultate durch die Meteorologen. Sie leiten aus dem berechneten Zustand der meteorologischen Größen der Atmosphäre – »Der Zustand der Atmosphäre zu einer beliebigen Zeit wird in meteorologischer Hinsicht bestimmt sein, wenn wir zu dieser Zeit in jedem Punkte die Geschwindigkeit [als drei skalare Größen], die Dichte, den Druck, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Luft berechnen können.«²⁴ – die entsprechenden Wetterlagen wie Niederschläge oder Stürme, aber auch Klimaent-

²⁴ Bjerknes, »Das Problem«, S. 2.

wicklungen ab. Dazu benötigen sie sieben Gleichungen, welche in ihrer Tradition bis auf Newton und Euler zurückgehen.²⁵ Diese Gleichungen bilden den Kern und die Dynamik jedes Wetter- oder Klimamodells, denn sie beschreiben die Bewegungskräfte, welche auf die Fluide wirken, als Zirkulationsprozesse der Atmosphäre. Da es sich dabei um ein hochgradig komplexes System handelt, könnte man ohne Computer nichts damit anfangen. Daher sind Wetter- und Klimaprognosen erst mit Hilfe automatischer Rechenmaschinen denkbar.

Ein Modell, das allein auf diesen sieben Gleichungen basierte, wäre jedoch eine ziemlich leere Modellwelt. Die Arbeit der Meteorologen der letzten fünfzig Jahre besteht vor allem darin, die Modelle mit realitätsnahen Details wie Wolken, Gebirgen, Ozeanen und mehr zu füllen. Allerdings darf man sich diese Details nicht als lebensweltliche Objekte vorstellen. Sie sind nur insofern im Modell integriert, als sie sich funktional auf die Wetter- und Klimaentwicklung auswirken. Im Falle der Ozeane wäre dies die Absorptionsleistung von Wärme oder Kohlendioxid, Gebirge verändern das Strömungsverhalten der Luft, und Wolken fungieren als Kristallisationsorte für Niederschläge. Dies sind nur einige Beispiele von Hunderten von Prozessen, die aktuelle Modelle anreichern. Um ein Klimamodell nun tatsächlich berechnen zu können, müssen für all diese Prozesse Annahmen über ihren konkreten Wert eingegeben werden. Üblicherweise geschieht dies auf Basis von Messdaten und sichert eine hinreichend realistische Ausgangsbasis der Berechnungen. Um die Güte eines Modells zu prüfen, wird es verschiedenen Tests unterzogen. Beispielsweise ist die Berechnung des Klimas von 1850 bis heute einer der wichtigsten Standardtests zur Evaluierung von Klimamodellen. Dieser Test basiert auf der Erkenntnis, dass sich der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre in diesem Zeitraum von 280 ppm (parts per milion) im Jahr 1850 auf 370 ppm heute erhöht hat. Eine Verdopplung des Kohlendioxidgehalts geht in etwa mit 1,5 bis 2 Grad Celsius Erderwärmung einher. Wird das

25 Um die sieben meteorologischen Variablen berechnen zu können, braucht es die drei hydrodynamischen Bewegungsgleichungen, die Kontinuitätsgleichung der Erhaltung der Masse, die Zustandsgleichung der Atmosphäre sowie die beiden Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie. Das Gleichungssystem beschreibt dabei den Zustand der Luftmassen (Dichte, Druck, Temperatur, Feuchte), deren Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte, Druck), die Massenerhaltung während der Bewegung (Geschwindigkeitskomponenten, Dichte) sowie die Veränderung der Energie und Entropie der Zustandsänderungen der Luftmassen (Variablen im Zusammenhang mit der von den Luftmassen ausgeführten Arbeit sowie den aufgenommenen und abgegebenen Wärmemengen durch solare Ein- und Ausstrahlung und vom Boden aufgenommener Energie).

heutige Klima bei einer Initialisierung mit Daten von 1850 durch die Berechnungen richtig wiedergegeben, kann das Modell auch für Prognosen genutzt werden.

Um jedoch Zukunftsszenarien rechnen zu können, fließen Annahmen über die Entwicklung des Kohlendioxidausstoßes in die Modelle ein, welche nur geschätzt werden können. Da die Resultate, üblicherweise in Form der globalen Erwärmung dargestellt, jedoch maßgeblich von diesen Annahmen bestimmt werden, bergen die Prognosen eine große Unsicherheit in sich. Dies bedeutet, dass trotz aller Approximationen, Idealisierungen und fehlender Prozesse in den Modellen selbst, die größte Unsicherheit für aussagekräftige Prognosen in der gesellschaftlichen Entwicklung begründet liegt. Im Unterschied zur Modellierung des Klimas, basierend auf physikalischen Gegebenheiten und Gesetzen, hängt der zukünftige Energieverbrauch und damit der Ausstoß von Kohlendioxyd von unterschiedlichen Faktoren ab. Das Verhalten von Konsumenten, die Entscheidungen von Politikern, die Entwicklung alternativer Energien und Technologien oder die Verfügbarkeit fossiler Energien stellen kaum vorhersagbare Faktoren dar. Um jedoch die Frage nach der Erderwärmung im Jahr 2050 oder 2100 mit Modellberechnungen annähernd beantworten zu können, bedarf es zutreffender Ausgangsannahmen zur Initialisierung der Modelle. Die für das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ausgeführten Szenarienberechnungen basieren daher auf verschiedenen ›Story Lines‹ möglicher Entwicklungen des Energiebedarfs und der dadurch verursachten Emissionen. »Four different narrative storylines were developed to describe consistently the relationships between emission driving forces and their evolution and add context for the scenario quantification. Each storyline represents different demographic, social, economic, technological, and environmental developments.«²⁶ Die Szenarienfamilien unterscheiden sich durch das angenommene Wirtschaftswachstum, die Entwicklung der Weltbevölkerung und die Nutzung fossiler beziehungsweise nicht fossiler Energieträger. Ohne diese Projektionen als Ausgangsbasis der Modellrechnungen könnten keine Vorhersagen über den

26 Nakicenovic/Swart, *Special Report*, S. 3. »Die Szenarienfamilie A1 beschreibt eine künftige Welt mit sehr raschem wirtschaftlichem Wachstum, mit einer Weltbevölkerung, deren Zahl bis Mitte des 21. Jahrhunderts zunimmt und danach abnimmt, und mit einer raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich durch ihren jeweiligen technologischen Schwerpunkt: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1FI), nicht fossiler Energiequellen (A1T) oder Ausgeglichenheit über alle Energieträger hinweg (A1B).« Max-Planck-Institut für Meteorologie, *Klimaprojektionen*, S. 8.

anthropogenen Klimawandel der nächsten Jahrzehnte berechnet werden. Aus mathematischer Sicht sind diese vagen Anfangs- und Randbedingungen jedoch eine Katastrophe. Denn man hat es mit Zahlenwelten zu tun, die – um hier noch einmal Henri Poincaré zu Wort kommen zu lassen – äußerst sensitiv sind: »Es kann der Fall eintreten, dass kleine Unterschiede in den Anfangsbedingungen große Unterschiede in den späteren Erscheinungen bedingen; ein kleiner Irrtum in den ersteren kann einen außerordentlich großen Irrtum für die letzteren nach sich ziehen. Die Vorhersage wird unmöglich und wir haben eine ›zufällige Erscheinung‹.«²⁷ Diese angeblich ›zufällige Erscheinung‹ sprengt den strengen Determinismus der exakten Wissenschaft, dass nichts »ungewiss sein [würde] und Zukunft wie Vergangenheit [...] offen vor Augen liegen.«²⁸ Nichtsdestotrotz extrapoliert Wissenschaft fröhlich weiter und überträgt die kausale Mechanistik auf sehr komplexe Sachverhalte, wie die Ökonomie, die Umwelt oder eben das Klima. Allerdings muss der Fairness halber gesagt werden, dass Wissenschaft und Gesellschaft keine anderen Möglichkeiten als die berechneten Prognosen der Computermodelle haben, wenn sie einen Blick in die Zukunft wagen wollen. Und dieser Blick, wenn auch eher verschwommen als glasklar, ist allemal besser, als ein Blindflug in zukünftige ökologische Katastrophen.

Amalgamierung von Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit im Zeitalter des Computers

Computer eröffnen mit der numerischen Simulation der Wissenschaft eine neue Methode mit komplexen und daher weniger stark idealisierten Systemen umzugehen und für diese Systeme zumindest vage Zukunftsprognosen zu erstellen. Dies war zuvor aufgrund mangelnder Rechenkapazitäten sowie der Stagnation in der analytischen Methode schlichtweg nicht möglich. Mit spektakulären Computerprognosen wurde das wissenschaftliche Systemdenken ab Mitte der 1960er Jahre über die Medien in der breiten Öffentlichkeit verankert. Vor allem die beiden Berichte des Club of Rome von 1972 (*Limit of Growth*) und 1974 (*Menschheit am Wendepunkt*) demonstrierten die Suggestionkraft der Computerprognosen.²⁹ Mittlerweile haben wir uns an

27 Poincaré, *Wissenschaft*, S. 56–57.

28 Laplace, »Philosophischer Versuch«.

29 Vgl. Meadows, *Limits of Growth*; Mesarovic/Pestel, *Menschheit*.

die »präzise elektronische Phantasie der Automatenhirne«³⁰ gewöhnt. Wie anders könnte sich die Selbstverständlichkeit erklären, mit welcher heute die Zukunft berechnet wird. Doch über diese Prognosekraft hinaus liegt der entscheidende Vorteil der Computermodelle in der »Förderung der Bewusstseinsbildung über Zusammenhänge, deren Vernachlässigung verhängnisvolle Folgen haben könnte,«³¹ vor allem in komplex rückgekoppelten Systemen. Dass wir dabei unbedingt Computer benötigen, liegt in der Natur der Komplexität, die unser Denken übersteigt.³² Nur Computermodelle können Rückkopplungen, Nichtlinearitäten und daher Komplexität darstellen und sichtbar machen, ebenso wie den heutigen Einfluss des Menschen auf seine Umwelt von morgen. Insofern sind Computermodelle die einzigen Erkenntnistechnologien, um diesen Einfluss zu reflektieren, zu verstehen und zu prognostizieren. Die numerisch generierte Voraussicht führt jedoch in Wissenschaft und Gesellschaft den neuen und paradoxen Seinsmodus der Antizipation der Nachträglichkeit vom Orte der Zukunft projiziert auf die Gegenwart ein, an den wir uns erst gewöhnen müssen. Diese Antizipationsleistung ist es, die Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit in bisher ungekanntem Ausmaß zusammenschweißt und Wissenschaft die Rolle der Prophetie in Form von Expertisen zuspricht. Das Problem aus wissenschaftlicher Sicht ist dabei, dass Prognosen der Überprüfung von Theorien und Modellen dienen. Doch aus wissenschaftlicher Perspektive sind die von der Gesellschaft eingeforderten Prognosen immer unerquicklich, denn sie bestätigen im schlimmsten Falle, also wenn soziopolitisch nicht gehandelt wird, nur die Richtigkeit der zugrunde liegenden Theorien. Das kann dem Wissenschaftler, der auch Mensch ist, nicht behagen. In allen anderen Fällen dokumentieren sie die nicht eingetretene Prognose und suggerieren damit ein »Versagen« der wissenschaftlichen Theorie. Beide Szenarien sind auf jeweils eigene Weise für Wissenschaftler nicht angenehm, aber eben auch nicht vermeidbar, will man einen wissenschaftlich fundierten Blick in die Zukunft werfen.

30 »Bombe im Rechner«, S. 115.

31 Kappel/Schwarz, *Systemforschung*, S. 51.

32 »Die mesoskalige Welt des frühen Menschen war zeitlich stabil, sozial streng geordnet, es kamen kaum abrupte Wechsel und Sprünge im Ablauf des Geschehens vor, und exponentielles Wachstum war unbekannt. Somit bewährte sich das monokausale Denken besonders auch deshalb, weil das eigene Handeln des Menschen keine nichtlinearen Rückkopplungen in seiner Welt verursachte.« Fortak, »Prinzipielle Grenzen«, S. 257.

Literatur

- Bjerknes, Vilhelm, »Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik«, in: *Meteorologische Zeitschrift*, Jg. 21 (1904), S. 1–7.
- »Bombe im Rechner«, in: *Spiegel*, Jg. 3 (1965), S. 115–116.
- Eckert, Michael, *The Dawn of Fluid Dynamics. A Discipline between Science and Technology*, Weinheim 2006.
- Fortak, Hans, »Prinzipielle Grenzen der Vorhersagbarkeit atmosphärischer Prozesse«, in: Günter Warnecke/Monika Huch/Klaus Germann (Hg.), *Tatort Erde. Menschliche Eingriffe in Naturraum und Klima*, Berlin 1991, S. 257–269.
- Frederichs, Günther, »Der Wandel der Wissenschaft«, in: *TA-Datenbank-Nachrichten*, Nr. 3/4, Jg. 8 (1999), S. 16–25.
- Funtowicz, Silvio O./Ravetz, Jerome R., »Science For the Post-normal Age«, in: *Futures*, Jg. 25, H. 7 (1993), S. 739–755.
- Goldstine, Herman H./Neumann, John von, »On the Principles of Large Scale Computing Machines«, 1946, in: John von Neumann (Hg.), *Collected Works*, Bd. 5, Oxford 1963, S. 1–32.
- Gramelsberger, Gabriele, *Computerexperimente. Zum Wandel der Wissenschaft im Zeitalter des Computers*, Bielefeld 2009.
- Grier, David A., *When Computers Were Human*, Princeton 2005.
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.), *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Genf 2007, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm> (Abruf: 17.07.2009).
- Kappel, Rolf/Schwarz, Ingo A. (Hg.), *Systemforschung 1970 – 1980. Entwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland*, Göttingen 1981.
- Laplace, Pierre Simon de, *Philosophischer Versuch über die Wahrscheinlichkeiten*, Leipzig 1814.
- Leibniz, Gottfried Wilhelm, »Novae methodus pro maximis et minimis«, in: *Acta eruditorum*, 1684, S. 466–73.
- Max-Planck-Institut für Meteorologie (Hg.), *Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert*, Hamburg 2006.
- <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/grafik/presse/Klimaprojektionen2006.pdf> (Abruf: 17.07.2009).
- Meadows, Donella H./Meadows, Dennis L./Randers, Jørgen/Behrens, William W. (Hg.), *The Limits of Growth*, New York 1972.
- Mesarovic, Mihailo/Pestel, Eduard (Hg.), *Menschheit am Wendepunkt*, Stuttgart 1974.
- Nakicenovic, Nebojsa/Swart, Rob (Hg.), *Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge 2000.
- Newton, Isaac, »De methodis serierum et fluxionum«, 1671, in: ders., *The method of fluxions and infinite series: with its application to the geometry of curve-lines*, London 1736.

- , *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, London 1687.
- , »Principia: Auctoris Praefatio«, 1687, übersetzt in: Gernot Böhme/ Wolfgang van den Daele/Wolfgang Krohn (Hg.), *Experimentelle Philosophie. Ursprünge autonomer Wissenschaftsentwicklung*, Frankfurt/M. 1977.
- Planck, Max, *Sinn und Grenzen der exakten Wissenschaft (Vortrag gehalten 1941)*, Leipzig 1947.
- Poincaré, Henri, *Wissenschaft und Methode*, Leipzig 1914, nachgedruckt in Darmstadt 1973.
- Stichweh, Rudolf, *Zur Entstehung des modernen Systems wissenschaftlicher Disziplinen: Physik in Deutschland 1740 – 1890*, Frankfurt/M 1984.
- Top 500 Supercomputer Sites, »Top 500 List 11/2009«, <http://www.top500.org> (Abruf: 17.07.2009).
- Weingart, Peter/Engels, Andrea/Pansegrau, Petra (Hg.), *Von der Hypothese zur Katastrophe. Der anthropogene Klimawandel im Diskurs zwischen Wissenschaft, Politik und Massenmedien*, Opladen 2002.