

SITZUNGSBERICHTE

LEIBNIZ-SOZietät DER WISSENSCHAFTEN

Cyberscience – Wissenschaftsforschung und Informatik

Digitale Medien und die Zukunft der Kultur
wissenschaftlicher Tätigkeit

Arbeitskreis „Emergente Systeme/Informatik
und Gesellschaft“ der
Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin
in Kooperation mit der
Gesellschaft für Wissenschaftsforschung (Berlin)

Herausgegeben von
Gerhard Banse & Klaus Fuchs-Kittowski

Mit Beiträgen von Gerhard Banse, Peter Brödner, Yaoli Du,
Rainer Fischbach, Christiane Floyd, Klaus Fuchs-Kittowski,
Hansjürgen Garstka, Hans-Gert Gräbe, Philipp Grüning,
Dirk Hagen, Ruth Edith Hagengruber, Ronda Hauben,
Gisela Jacobasch, Horst Junker, Wolfgang Kleinwächter,
Klaus Kornwachs, Werner Krause, Harald A. Mieg, Falk Nette,
Daniel H. Rapoport, Nadine Schumann, Erdmute Sommerfeld,
Christian Stary, Stefan Ullrich, Werner Zorn



BAND 150/151

JAHRGANG 2022

SITZUNGSBERICHTE
BAND 150/151 JAHRGANG 2022



LEIBNIZ-SOZietät DER WISSENSCHAFTEN ZU BERLIN

Inhalt

Gerhard Banse, Klaus Fuchs-Kittowski
Einführung 9

1 PROBLEMFELD UND METHODENGEFÜGE DER FORSCHUNGSSITUATION

Werner Zorn
Internet: Von AUP – Acceptable Use Policy – zu LoG – Limits of Growth –??? 33

Christiane Floyd
Wissensprozesse in der Cyberscience 53

Christian Stary, Klaus Fuchs-Kittowski
Zur Methodologie sozio-technischer Informationssystem- und Arbeitsgestaltung 79
Erkenntnistheoretische Überlegungen zum Einsatz von Design Science zur sozio-technischen Informationssystem- und Arbeitsgestaltung

Klaus Kornwachs
Zur Systemtheorie des Lesens und Schreibens – Skizze einer Theorie der Pragmatischen Information 103

Nadine Schumann, Yaoli Du
Pragmatische Information in Interaktion 125

2 EXPERIMENT UND MODELL

Werner Krause, Erdmute Sommerfeld
Universalien des Denkens und Entropiereduktion im Denken 135
Über die Messung von Denkleistungen, über die Abbildung kognitiver Strukturtransformationen auf neuronale Strukturen und über einen möglichen Weg zur Bestimmung einer mentalen Grammatik

Daniel H. Rapoport, Falk Nette, Philipp Grüning 3D-Bewegungsanalyse von Immunzellen für die Diagnostik	157
Rainer Fischbach Gedanken zum epistemischen Status von Modellen	161
Gisela Jacobasch Mathematische Modellierung von Stoffwechselwegen roter Blutzellen und Malariaparasiten	175
 3 VERFÜGBARKEIT VON WISSEN UND GERÄT	
Hansjürgen Garstka Verfügbarkeit von Wissen in der digital orientierten Wissenschaft	197
Horst Junker Auf dem Weg zu einer Nachhaltigkeitsinformatik	205
Dirk Hagen KI-basiertes Matchmaking als innovatives Steuerungsinstrument zur wissenschaftlichen Netzwerkbildung	223
 4 RELEVANZ FÜR ERKENNTNIS UND GESELLSCHAFT	
Stefan Ullrich Verantwortung und das Internet der Dinge	237
Ruth Edith Hagenruber Die „dritte Wissensdimension“ Eine Epistemologie für eine neue Wissenswelt	253
Peter Brödner Informatik – eine Wissenschaft auf Abwegen	257
Harald A. Mieg Computerethik – oder: Was tun, wenn wir irgendwann eigentlich nicht mehr den Rechner ausschalten dürfen?	275

<i>Inhalt</i>	7
Klaus-Fuchs-Kittowski Addendum: Überlegungen nach der Lektüre des Beitrags von Harald A. Mieg	287
Hans-Gert Gräbe Zur Genese einer „Cyberscience“	303
Ronda Hauben Creating the Vision for the Internet From the Wiener Circles to Licklider and ARPA's Information Processing Techniques Office (IPTO)	317
Wolfgang Kleinwächter Wer regiert das Internet: Kommunikationstechnologie und Informationsfreiheit zwischen Demokratie und Autokratie	335
Autorinnen und Autoren	345

Rainer Fischbach

Gedanken zum epistemischen Status von Modellen

Abstract

Model building is a method of research as well as of prognosis and planning. Since the arrival of digital data processing it disposes about an instrument of increasing flexibility and power, although not about one capable of compensating for a lack of understanding or data. While converting deeply structured conceptual models into linear sequences of storage words poses methodological problems, increasing model sophistication often generates resource requirements ascending stronger than linear with granularity. Growing dependence of political decisions on model-based prognosis demands a deeper understanding of their epistemic problems, particularly of the unavoidable difference between model and reality.

Keywords/Schlüsselwörter

Computing resource requirements, COVID-19, Forecasting, Model building, Prognosis, Rumsfeld matrix

COVID-19, Computerressourcen, Modellbildung, Prognose, Rumsfeld-Matrix, Vorhersage

Dass die Leistungsfähigkeit von Digitalrechnern in den letzten Jahrzehnten sowohl was ihre Geschwindigkeit im Sinne von Operationen pro Zeiteinheit und im Sinne der Anzahl von parallel nutzbaren Prozessoren als auch was ihre Speicherkapazität angeht, um Größenordnungen gewachsen ist, stellt eine selbstverständliche Voraussetzung heutiger Wissenschaftspraxis dar. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob ihre Fähigkeit, den Prozess wissenschaftlicher Erkenntnis oder gar deren Umsetzung in nutzbare Technik bzw. in gesellschaftliche Interventionen zu unterstützen, in gleichem Maße gewachsen ist. Grenzen setzt natürlich die nicht in gleichem Maße gewachsene menschliche Fähigkeit, Fragestellungen und Hypothesen zu entwickeln, experimentelle Anordnungen zu konstruieren, Messungen vorzunehmen, Berechnungen zu spezifizieren und in ausführbare Programme zu überführen. Automatisierung vermag diese Grenzen auszudehnen – nicht nur im

Labor, sondern auch im Verhältnis von Hypothese zu Berechnung. Dies ist das Feld der Modellierung durch Software. Während in der Anfangszeit mittels Software die Rechenverfahren, wie etwa die zur Lösung von linearen Gleichungssystemen oder von Differentialgleichungen, automatisiert wurden, indem die Einzelschritte zu einem Verarbeitungsfluss gefügt wurden, werden seit den 1970ern zunehmend Rechenverfahren und die Datenstrukturen, auf denen diese operieren, zu Gebilden komponiert, die ganze Gegenstandsbereiche mit ihrer Dynamik abbilden sollen. In der Technik leisten solche Modelle heute in Gebieten, in denen es gut bewährte Theorien gibt, als Werkzeuge für Konstruktion, Planung, Beschaffung, Fertigung, Logistik etc. wertvolle Dienste und ersparen oft – klassische Felder bilden etwa die Statik und Dynamik von Konstruktionen – viele aufwendige Tests, doch haben sich Modellstudien auch als wissenschaftliche Disziplin etabliert und sie werden zunehmend zur Begründung politischer Forderungen und entsprechender Entscheidungen herangezogen. Im Zusammenhang der Legitimation von Maßnahmen gegen COVID-19 exponierte sich diese Vorgehensweise der Öffentlichkeit in besonderer Weise als politisches Instrument und lädt dadurch zur methodischen Überprüfung ein. Haben nach dem gültigen Verständnis von Wissenschaft Hypothesen sich im Experiment zu bewähren, dem sie in Gestalt des Modells gegenüberstehen, dann entsteht in Situationen, in denen das Experiment, sei es, weil ethisch unvertretbar, sei es, weil es um die Zukunft geht, nicht verfügbar ist, eine epistemisch ungeklärte Situation. Wenn an einem solchen Punkt Modelle an die Stelle von Experiment und Messung treten sollen, stellt sich umso mehr die Frage nach deren epistemischem Status und konkret nach Qualitätsmaßstäben für sie. Dies sind dann zunächst Fragen nach Softwarequalität und Datenqualität, doch dann nach der Gewichtung von Merkmalen des Gegenstands in der Modellierung, d. h. insbesondere wovon diese abstrahiert, nach deren Transparenz und nicht zuletzt, ob die Gewinnung der Daten und der Umgang mit ihnen ethischen Maßstäben entsprechen.

Die Bedeutung von Modellen

Systematisch vorgehende, intersubjektive und reproduzierbare Erkenntnis ist auf Modelle ihrer Gegenstände angewiesen. Modelle sollen Komplexe von Erscheinungen erklären und einordnen sowie ihr Verhalten vorhersagen. Das Modell ist die partielle Nachbildung des Gegenstandes aus bekannten, handhabbaren Elementen. Es bildet den Gegenstand unter einer bestimmten Zielsetzung nicht vollständig, sondern verkürzt ab (vgl. Stachowiak 1973: 131ff.). Die Verkürzung ergibt sich oft bewusst aus der Zielsetzung der

Modellierung, doch kann sie auch Folge eines unzureichenden Verständnisses des Gegenstandes oder mangelnder Mittel zu dessen detaillierterer Abbildung sein. Sie ist jedenfalls in mehrfacher Weise konstitutiv für die Funktionen des Modells. Für die Erkenntnisfunktion, da, einmal abgesehen davon, dass hinsichtlich vieler Gegenstände sowohl das Wissen als auch die Mittel dazu fehlen, ein Modell, das die Komplexität des Gegenstandes identisch abbildete, so undurchschaubar wäre wie dieser selbst, und für die Prognosefunktion, weil der Vorzug eines Modells doch darin bestehen soll, verfügbar zu sein, bevor die modellierten Ereignisse eintreten, und im Kontext von Planungen auch deutlich geringeren Aufwand verursachen soll als die geplante Sache bzw. Aktivität – was beides bei einer unverkürzten Modellierung schwer zu erreichen wäre.

Modelle abstrahieren einerseits nicht nur von Merkmalen ihres Gegenstandes, sondern besitzen andererseits auch Merkmale, die ihr Gegenstand *nicht* aufweist. Letztere entstehen aus Eigenschaften der Modellelemente, die mit dem Gegenstand nichts zu tun haben. Die astronomischen Uhren, die in früheren Jahrhunderten als Modelle des Planetensystems dienten, umfassten z. B. Zahnräder und Gestänge, die nichts davon abbildeten, sondern die Abbildung nur unterstützen. Um ein Modell zu verstehen, ist eine doppelte Abstraktion erforderlich, nämlich sowohl von dem, was am Gegenstand außerhalb des die Modellierung leitenden Interesses bzw. der diesem zur Verfügung stehenden Mittel liegt, als auch von dem, was im Modell unmittelbar nichts vom Gegenstand abbildet. Ein treffendes Verständnis kann sich deshalb unabhängig vom Handlungszusammenhang der Modellierung, also von deren pragmatischer Dimension, nicht bilden. Die Charakterisierung der Beziehung zwischen Modell und Gegenstand als Widerspiegelung ist deshalb inadäquat. Spiegelungen sind totale, injektive und zu sich selbst inverse Abbildungen – was auf die Modellrelation nicht zutrifft. Treffender wäre es, von strukturellen Ähnlichkeiten und selektiven Analogien bzw. Proportionalitäten zu sprechen – selbst wenn die Repräsentation der Größen digital erfolgt.

Vertiefte Erkenntnis der Beschaffenheit eines Gegenstandes, Prognose seines Verhaltens oder Planung einer Sache bzw. Aktivität: das sind die wesentlichen Zwecke, zu denen Modelle erstellt werden. Von anderen Zwecken wie denen der Übung oder des Spiels sei hier abgesehen. Ebenfalls außerhalb der Betrachtung bleibt der Begriff des Modells aus der mathematischen Logik, wo man unter einem Modell einer Menge von Axiomen eine spezifische Struktur versteht, die diese Axiome unter einer bestimmten Interpretation von deren Termini durch Komponenten der Struktur erfüllt. Die Funktion von Modellen in Bezug auf jene zuvor genannten Zwecke ist sinnvoll nur

im Zusammenhang von Theorien der jeweiligen Gegenstände zu diskutieren. Keine Theorie im Sinne der empirisch-analytischen Wissenschaften kommt ohne Modellvorstellungen aus. Auch das Experiment als wesentliches Werkzeug ist von solchen Vorstellungen abhängig, da sich ohne solche kaum sinnvolle Fragestellungen entwickeln lassen. Wissenschaft bewährt sich letztlich nicht im bloßen Datensammeln, sondern darin, dass sie gehaltvolle Hypothesen und Modelle entwickelt, aus denen empirisch, d. h. durch korrespondierende Experimente, überprüfbare Vorhersagen ableitbar sind. Dabei gab es durchaus auch Fälle, in denen erst eine neue Hypothese mit einem entsprechenden Modell Licht auf ein bereits vorhandenes Korpus von Daten zu werfen vermochte. Dies war z. B. bei der Entstehung der modernen Astronomie der Fall. Abweichungen zwischen modellbasierter Vorhersage und experimentellen Ergebnissen können wiederum zur Anpassung oder auch Verwerfung von Hypothesen und Modellen führen. Dies allerdings erst, nachdem geklärt ist, dass Modell *und* Experiment korrekt aufgebaut und ausgeführt wurden.

Klaus Fuchs-Kittowski und Jens Reich schlugen das sogenannte Lungenflügel-Diagramm vor, um den Zusammenhang von Modell und Experiment zu veranschaulichen (siehe Abb. 1). Dieses Diagramm stellt jedoch nur eine der vielen Funktionen der Modellierung im Erkenntnisprozess dar: die des ausgearbeiteten rechnerischen Modells, das als Gegenpart des Experiments seit den 1970ern zunehmend auf Computern implementiert wird. Doch die Modellbildung ist im Prozess der Theorieentwicklung auf allen Stufen präsent, nicht nur als Gegenpart zum Experiment. Als Ersatz für das Experiment fungiert die Modellierung dort, wo es, wie in der Technik, hinreichend bewährte Theorien gibt, so dass die Planung auf viele Tests, wie Experimente in diesem Kontext heißen, verzichten kann, und dort, wo Experimente nicht möglich sind. Beim Test geht es weniger um die Überprüfung der Theorie als vielmehr um deren Angemessenheit für die vorliegende Aufgabe bzw. darum, ob die konstruktive Lösung funktioniert und korrekt ausgeführt wurde. Doch selbst wenn Computermodelle Tests zunehmend ersetzen, wird man in der Technik auf Tests bzw. eine Erprobung der Produkte in der Praxis selten verzichten können.

Ganz anders ist die Lage dagegen in den meisten Fällen, in denen das Experiment nicht zur Verfügung steht, sei es, weil es ethisch nicht vertretbar wäre, sei es, weil es um die Zukunft geht. Hier sind in vielen Fällen die theoretischen Grundlagen unsicher, die Daten lückenhaft oder die Modelle wegen unzureichender Ressourcen nicht in der erforderlichen Auflösung implementierbar bzw. es liegt eine Kombination dieser Mängel vor. Gerade

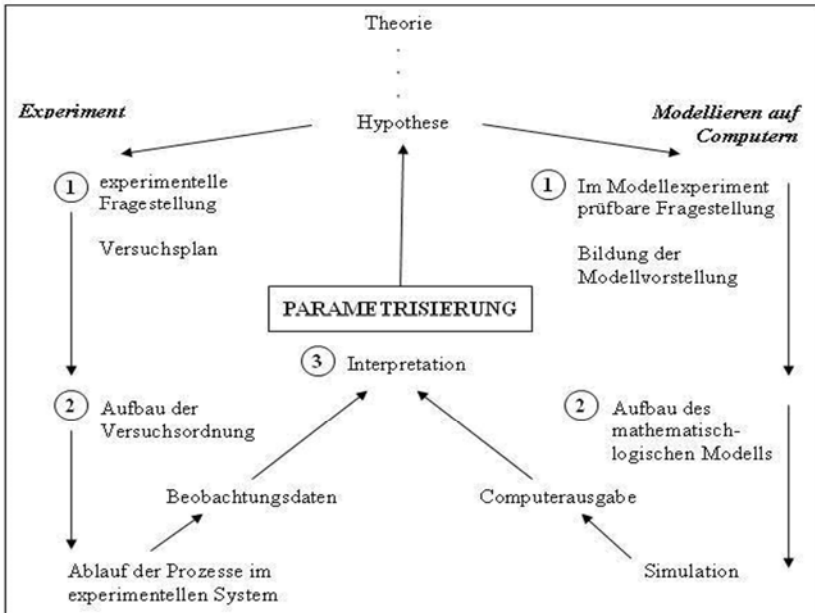


Abb. 1: Lungenflügel-Diagramm

Quelle: nach Fuchs-Kittowski 2007: 45

hinsichtlich der Fragen, an denen ein großes öffentliches Interesse besteht – die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung im nationalen wie im globalen Rahmen, die Entwicklung des globalen wie des regionalen Klimas, die Verbreitung von Infektionskrankheiten, etc. – bleibt die Modellbildung oft auf unsichere bzw. lückenhafte Fundamente angewiesen. Der Bericht des Club of Rome zu den *Grenzen des Wachstums* (vgl. Kupper 2018), der als Paradigma einer auf großmaßstäblicher, computergestützter Modellierung basierenden Prognose gelten kann, ragt durch seinen Erfolg wie durch seinen Misserfolg heraus: erfolgreich war er, sofern er nicht nur zu einer bis heute wirksamen und wachsenden Sensibilisierung für seine Fragestellung führte, sondern auch der angewandten Modellierungstechnik den Weg zu breiter Rezeption ebnete; nicht erfolgreich, weil seine Aussagen so weit neben der dann tatsächlich eingetretene Entwicklung lagen, dass er auch eine Rolle als paradigmatische Warnung vor den Fallstricken dieser Technik spielen muss, die nicht übersehen werden darf, auch wenn wir heute vieles besser können und auch weit leistungsfähigere Instrumente zur Verfügung haben.

Beachtung erfordert gerade auch die technische Spezifik von Computermodellen. Modellelemente können sonst Größen, physische, geometrische bzw. graphische Gebilde oder Daten sonstiger Art sein, ihre genaue Beschaffenheit und ihr Zusammenhang mittels mathematischer Formeln, verbalen, vielleicht durch Zeichnungen oder Diagramme unterstützten Beschreibungen gegeben sein. Computermodelle bestehen dagegen letztlich aus Folgen von Speicherworten, die Modellelemente entweder in der Form von Operanten oder von Operationen repräsentieren und schließlich der Ausführung der letzteren auf den ersteren. Die Entwicklung eines Computermodells setzt ein, mittels der herkömmlichen verbalen, mathematischen, graphischen Mittel erstelltes, konzeptionelles Modell voraus – wobei die Kluft zwischen diesem und den unspezifischen, durch Gleichförmigkeit gekennzeichneten, Strukturen des Computers zu überbrücken, eine methodische Herausforderung beinhaltet, an der sich die Informatik bis heute abarbeitet.

Ein Blick zurück

Das vorherrschende Bild der Computertechnik, der Informatik und ihrer inzwischen in eine unüberschaubare Breite gewachsenen Anwendungsgebiete ist das von Disziplinen, die sich in einem sich beschleunigenden Fortschritt befinden. Schon das Bild des statischen Bildes erscheint inadäquat, treffender scheint eher der englische Begriff *moving picture* zu sein, da auch der deutsche Begriff *Film* viel zu unspezifisch ist und auch zu harmlos klingt. Doch nachdem man ein paar Jahrzehnte dieses *moving picture* miterlebt hat, verspürt man auch die Versuchung, in den Rückspiegel zu schauen, um noch einmal einen Blick auf die hinter uns liegenden Landschaften zu werfen. Die wichtigen Fragen sind die nach den Stufen, die entscheidende Verbesserungen gebracht haben, auf der einen und nach den Problemen, die gleich geblieben sind, auf der anderen Seite – wobei auch in Betracht zu ziehen ist, ob nicht gerade die vielen sichtbaren Fortschritte verdecken, was an Schwierigkeiten geblieben ist. Diese Fragen für das gesamte Feld stellen oder gar beantworten zu wollen, wäre vermessen, doch sei versucht, sie bezüglich der hier thematisierten Problematik der Modellierung wenigstens zu skizzieren.

Die Arbeit mit Computermodellen bzw. der Versuch, solche zu bauen und praktisch anzuwenden, ist zunächst mit drei Schwierigkeiten konfrontiert:

1. ein vielfältig strukturiertes, unter Umständen auch hochkomplexes mentales Artefakt auf eine nachvollziehbare, d. h. auch für Dritte verständliche, überprüfbare und gegebenenfalls korrigierbare und erweiterbare

- Weise in das homogene, rein linear strukturierte Medium des Computerspeichers abzubilden;
2. dabei mit den Beschränkungen des nur in endlichen Mengen vorhandenen physischen Speichers umzugehen;
 3. die spezifizierten Operationen innerhalb von angesichts der Aufgabenstellung sinnvollen Zeiträumen mittels der gegebenen Prozessoren von beschränkter Leistung auszuführen.

Tatsächlich konnten in den letzten Jahrzehnten entscheidende Fortschritte in allen drei Punkten erzielt werden, ohne jedoch die Schwierigkeiten vollständig aufzuheben. Von Bedeutung sind auch Verbesserungen, die nicht auf Hardware zurückgehen, sondern auf Systemsoftware, die deren Nutzbarkeit erhöht. Wichtige Beiträge dazu waren der virtuelle Speicher, der den Adressraum jenseits der Grenzen des physisch vorhandenen Halbleiterspeichers zu nutzen erlaubt, und Mehrprozesssysteme, die auf einem einzigen physischen Prozessor mehrere logisch parallele Prozesse ermöglichen – was insbesondere die Implementierung dynamischer Modelle mit einer Vielzahl von Agenten erleichtert. Allerdings haben diese Verbesserungen auch Kosten in Form von zusätzlichen Prozessorzyklen, Speicherworten und Ein/Ausgabeoperationen.

Im Unterschied zu den Punkten 2. und 3., bei denen Fortschritte aus Forschung und Entwicklung in Form von anwendbaren Produkten in die Praxis gelangen, ist dies bei Punkt 1. nur bedingt der Fall. Wesentliche Hilfsmittel sind hier Methoden und Werkzeuge wie z. B. Programmiersprachen und entsprechende Übersetzer, die produktiv nur durch aktive Aneignung einzusetzen sind. Die Entwicklung verlief hier vor allem in den ersten Jahrzehnten sehr langsam und noch langsamer verlief die breite Übernahme durch die Praxis. Die vielfältigen Leistungen auf diesen Gebieten zu würdigen übersteigt den hier gegebenen Rahmen, doch als Marksteine seien hier Publikationen hervorgehoben wie der Band *Structured Programming* (vgl. Dahl et al. 1972), dessen Beiträge mit Überlegungen zur Datenstrukturierung und zur Technik der Objektorientierung weit über das hinausgingen, was auch noch Jahrzehnte später unter diesem Begriff verstanden werden sollte, die wesentliche Argumente für die Objektorientierung entfaltende Diskussion der Kriterien, denen die Strukturierung von Softwaresystemen folgen sollte, durch David Parnas (vgl. Parnas 1972) und schließlich das polymorphe Hindley-Milner Typsystem (vgl. Milner 1978), das den Bereich der sauber und nachvollziehbar modellierbaren Sachverhalte entscheidend ausdehnte. Entscheidend sind in diesem Zusammenhang zwei Aspekte: zunächst, dass

es nicht allein darum geht, das Geschäft der Modellierung produktiver zu machen, d. h. zu erleichtern und zu beschleunigen, sondern auch darum, es als kommunikativen Akt ernst zu nehmen, es nachvollziehbar und überprüfbar zu machen und weiterhin, dass diese so verstandene Tätigkeit Voraussetzungen hat in Gestalt einer methodischen und sprachlichen Bildung – wobei letztere sich nicht allein auf Sprachen für die Modellierung und Programmierung erstrecken sollte, sondern auch auf die natürlichen. Die Fähigkeit, Sachverhalte in klarer natürlicher Sprache zu beschreiben, gehört inzwischen zu den knappsten Ressourcen der Technologiebranchen auch außerhalb der Softwareentwicklung.

Die Leistungsfähigkeit der Hardware steigerte sich in den letzten Jahrzehnten um Größenordnungen, doch mit nachlassenden Raten. Beispielhaft dafür die Speicherausstattung eines Arbeitsplatzrechners für anspruchsvollere Aufgaben, die sich von Anfang der 1980er bis Anfang der 1990er Jahre tausendfach, von 64 KB auf 64 MB, steigerte, doch für die nächste Steigerung um diesen Faktor auf 64 GB schon zwei Jahrzehnte benötigte. Allerdings stiegen der *verfügbare* Speicher und die *verfügbaren* Prozessorzyklen nicht in gleichem Maße an wie die von der Hardware bereitgestellten, da der Ressourcen hunger der Systemsoftware und auch der Anwendungen, auf die man heute kaum verzichten kann, die Geschenke des technischen Fortschritts zu einem beachtlichen Teil wieder auffrisst. Nicht nur, dass *Moore's Law* nicht mehr uneingeschränkt gilt, *Wirth's Law* (vgl. Wirth 1995) begrenzt seine Wirksamkeit, in geringerem Maße auf den Servern, deutlich stärker jedoch in der persönlichen Arbeitsumgebung.

Beharrliche Probleme

Doch auch unabhängig von solchen Behinderungen wächst der Nutzen von Leistungssteigerungen der Hardware auch dort, wo man sie relativ ungehindert nutzen kann, nicht proportional zu ihnen. Eine Wetterprognose, die zwar sehr genau mittels eines elaborierten Modells erstellt wurde, deren Berechnung jedoch erst fertig ist, wenn das vorhergesagte Wetter schon eingetreten ist, mag durchaus von wissenschaftlichem Interesse sein, etwa bezüglich der Frage, wie korrekt bestimmte Modelle einen Verlauf vorhersehen können, doch hilft sie z. B. Bauern, Seeleuten oder denen, die einen Ausflug planen, wenig. Doch geht es hier um mehr als nur um einen Kompromiss zwischen Korrektheit und Zeitigkeit. Vielmehr war gerade die Wetterprognose das Feld, auf dem zuerst ein fundamentales Problem einer ganzen Modellklasse sichtbar wurde: nichtlineare Systeme können ein chaotisches

Verhalten zeigen, d. h. kleinste Abweichungen in den Ausgangsbedingungen können schon nach wenigen Iterationen zu großen Abweichungen in den Ergebnissen führen (vgl. Saravanan 2022: 27–33). Durch eine höhere Auflösung des Erfassungsrasters, genauere und vor allem konsistent gemachte Daten kann man die Reichweite, bis zu der solche Modelle stabil innerhalb eines akzeptablen Bereichs bleiben – bei der Wettervorhersage mit sehr guten Resultaten auf drei, mit gerade noch brauchbaren auf sieben Tage –, ausweiten, doch das Problem prinzipiell nicht aus der Welt schaffen. Die letzten Jahrzehnte brachten eine nahezu exponentielle Steigerung des verfügbaren Speichers und der Prozessorleistung, doch nur eine lineare Steigerung des Zeitraums bzw. der Zuverlässigkeit der Vorhersage, ja es besteht sogar Anlass zu der Vermutung, dass die lineare Steigerung in einen Sättigungsverlauf übergeht (vgl. Saravanan 2022: 42). Selbst die massive Steigerung der Rechnerleistung bringt nur schwindende Grenzerträge.

Ein Modell stellt auch im günstigsten Fall nur eine endliche Annäherung an seinen Gegenstand dar. Grenzen setzen oft nicht nur die verfügbaren Mittel zur praktischen Ausführung, also bei Computermodellen Speicherumfang und Prozessorleistung, sondern auch das unzureichende Verständnis von Detailfragen. Auch Wetter- und Klimamodelle können bestimmte Aspekte des Geschehens nicht detailliert wiedergeben, sondern müssen Näherungsformeln mit geeigneten Parametern benutzen, wobei genau die Bestimmung dieser Parameter ebenso entscheidend wie schwierig ist. Eine Erfahrung, die ich anhand einer deutlich simpleren Aufgabe machte, mag das illustrieren. In der Folge der Ölkrise der 1970er Jahre wurde Energieeinsparung zu einem politischen Thema, das sich 1977 in einem, 1983 verschärften, Gesetz für den Bausektor und entsprechenden Neufassungen der DIN 4108 niederschlug. Die Idee, die Planer mit einer Anwendung für die gerade aufkommenden Arbeitsplatzrechner zu unterstützen, lag da nahe und für die Modellierung der Struktur der Bauwerkshülle mit ihren physikalischen Parametern waren Werkzeuge wie das damals neue UCSD-Pascal (vgl. Bowles 1977) wie geschaffen. Während der Nachweis der durch die Norm geforderten Mindestdämmung mittels einer simplen Funktion zu bewerkstelligen war, hätten Aufgaben wie die Ermittlung des Wärmebedarfs und des in einer Konstruktion anfallenden Tauwassers streng genommen eine Simulation mit Hilfe von elaborierten Wettermodellen erfordert. Doch hier bot die DIN eine Abkürzung an: der dynamische Verlauf war durch einen stationären Fall zu ersetzen, dessen Parameter für unterschiedliche Regionen und Städte einer Tabelle zu entnehmen waren. Diese Parameter beruhten auf Erfahrungswerten.

Auf ungesicherten Boden begab man sich jedoch, indem man die Entscheidung für einen Wärmeschutz, der über die gesetzlichen Anforderungen hinausging, ökonomisch zu fundieren versuchte, wie ich das damals vor mehr als vier Jahrzehnten unternahm. Wärmeschutz ist ein Beispiel abnehmender Grenzerträge, eine lineare Steigerung des Wärmedurchlasswiderstands bringt nur exponentiell abnehmende Erträge. Den möglichen Einsparungen an Energie sind die kapitalisierten Kosten der dazu nötigen konstruktiven Aufwände über den Investitionszeitraum gegenüberzustellen. Dazu hätte man Modelle der Energie- und der Finanzmärkte gebraucht. Mangels solcher Modelle lag es nahe, konstante Raten für die Steigerung der Energiepreise und den Zins anzunehmen. Doch die Annahmen, die man damals unter dem Eindruck der Ölkrise gemacht hatte, stellten sich alle als falsch heraus: während in den 1980er Jahren politische Arrangements mit den führenden Förderländern den realen Ölpreis senkten und niedrig hielten, sollten die Federal Reserve und in ihrem Gefolge die anderen Notenbanken den Zinssatz in ungeahnte Höhen treiben. Wärmedämmung blieb, ganz anders als das fehlerhaft parametrisierte Modell es vorhergesehen hatte, ein schlechtes Geschäft. Tatsächlich blieben die Energiepreise im Verhältnis zum Konsumentenpreisindex seit Jahrzehnten ungefähr gleich und sanken im Verhältnis zu den Einkommen beständig (vgl. Flassbeck 2021).

Um die Komponenten des skizzierten Modells in der durch Ramalingam Saravanan modifizierten Rumsfeld-Matrix (vgl. Saravanan 2022: 194–196) zu lokalisieren: die Berechnung der durchschnittlichen Wärmeleitfähigkeit liegt im Felde der *known knowns*, die des Wärmebedarfs und des anfallenden Tauwassers in dem der *well-known unknowns* und die von Ersparnis bzw. Verlust durch zusätzliche Wärmedämmung in dem der *poorly known unknowns*. Saravanas Differenzierung der *known unknowns* in *well-known* und *poorly known* war durch die Lage in der Klimamodellierung motiviert, wo es für bestimmte Prozesse und Zusammenhänge, die gegenwärtig in Folge der zu geringen Auflösung der Modelle nicht explizit darstellbar sind, bewährte parametrische Näherungen gibt, während bei anderen große Ungewissheit besteht und bestenfalls Intervalle ohne Wahrscheinlichkeitsdichte für die Parameter angegeben werden können. Ein Beispiel für den ersten Fall sind die Turbulenzen an Grenzflächen, Beispiel für den zweiten die Rollen der Aerosole und der Wolkenbildung.

Über eine zentrale Eigenschaft des Klimas besteht weiterhin Ungewissheit: auch immer elaboriertere Modelle konvergieren nicht gegen einen bestimmten Wert für dessen Sensitivität gegenüber der CO₂-Konzentration, vielmehr scheint sich das Intervall eher aufzuspreizen, so dass von einem *un-*

	← Accuracy →	
↑ Awareness ↓	Known knowns	Well-known unknowns Poorly known unknowns
	Unknown knowns	Unknown unknowns

Abb. 2: Modifizierte Rumsfeld-Matrix

Quelle: nach Saravanan 2022: 194–196

certainty plateau (vgl. Saravanan 2022: 188) die Rede ist. Hier ist es nicht, wie beim Wetter, der chaotische Charakter der Zusammenhänge, sondern das mangelnde Verständnis wichtiger Faktoren, das den Fortschritt begrenzt. Auch *brute force* verspricht hier kaum Erfolg, da die Verfeinerung der Modellauflösung mit einer kubischen Steigerung des Speicher- und des Energiebedarfs einhergeht, dabei jedoch von der Leistungssteigerung, die zunehmend durch die Vervielfachung der Prozessorkerne und deren Unterstützung durch Graphikprozessoren, die auf Matrizenoperationen spezialisiert sind, zu erzielen ist, kaum profitiert (vgl. Saravanan 2022: 262–267).

Neue Aufbrüche?

Die Parallelisierung und die Graphikprozessoren geben vor allem KI-Techniken neuen Schub, die schon länger bekannt sind doch bisher unter dem Mangel an adäquater Rechnerleistung litten. Die dort zum Einsatz kommenden Modelle beruhen nicht auf einer inhaltlichen Analyse des Gegenstands, sondern auf statistischen Eigenschaften bestimmter Merkmale bzw. der diese repräsentierenden Variablen, zwischen denen Zusammenhänge mittels klassischer Techniken der Regression bzw. der Clusterbildung oder mittels (tiefer) neuronaler Netze konstruiert werden. Doch sinnvoll sind auch diese Verfahren nur, wenn man eine brauchbare Hypothese hat, die man ohne ein analytisches Verständnis des Gegenstandes schwerlich zu entwickeln vermag, und man zudem über qualitativ hochwertige Daten verfügt, die es erlauben, aus ihnen Zusammenhänge zu konstruieren. Dies nennt sich heute Maschinenlernen, doch Konditionierung ist wohl der treffendere Begriff. Nicht aus der Welt zu schaffen ist damit das Problem der Induktion, weil selbst aus noch so vielen, noch so guten Daten kein Gesetz ableitbar ist (vgl. Fischbach 2020).

Die statistischen Verfahren sind relativ erfolgreich, wo es um rekurrende Sachverhalte prinzipiell gleicher Natur geht, für die ein großer Vorrat

an Beispielen existiert, wenn sie auch nicht die Zuverlässigkeit erreichen, über die klassische analytische Modelle in Bereichen verfügen, von denen ein profundes theoretisches Verständnis vorhanden ist. Doch ist die personalisierte Werbung auch schon bei einer Treffsicherheit lukrativ, die bei einem Finite-Elemente-Modell (FEM) für mechanische Lastsituationen von Konstruktionen einer Katastrophe gleichkäme. In der Proliferation entsprechender Modelle auf Gebieten, von denen es weder ein adäquates Verständnis noch verlässliche Daten gibt, liegt vor allem eine Gefahr, wenn darauf weitreichende Entscheidungen gegründet werden. Grundsätzlich stößt die Modellbildung an Grenzen, wo es darum geht, eine Zukunft vorherzusagen, für die es weder Beispiele gibt, die Ansätze für statistische Modellierung böten, noch ein hinreichendes theoretisches Verständnis, das es erlaubte, ein analytisches Modell zu konstruieren. Diese Grenzen sind auch durch noch so viel Rechnerleistung nicht aufzuheben. Doch selbst dort, wo, wie z. B. bei den Klimamodellen, eine feinere Granularität eine höhere Genauigkeit verspricht, scheitert dies an der disproportionalen Steigerung des Ressourceneinsatzes, den das erforderte.

Selbst in Bereichen, von denen es profunde theoretische Einsichten gibt, kann die Konstruktion angemessener Modelle scheitern. Dies ist z. B. in der Epidemiologie der Fall, wo klar ist, dass man dabei die Netzwerke der sozialen Kontakte zugrunde legen müsste. Doch genau davon gibt es keine hinreichenden Daten. Im Grunde müsste man die realen Kontakte 1:1 abbilden. Hier stößt man an eine Grenze der Reduzierbarkeit, die Saravanan als *Carrol-Borges-Limit* bezeichnet (vgl. Saravanan 2022: 189), doch wird schnell klar, dass in Netzwerken Clustereffekte eintreten, die die exponentielle Ausbreitung eines Pathogens verhindern. Das Gleiche tun Faktoren wie eine bereits vorhandene Immunität durch unerkannt gebliebene Infektionen bzw. Kontakt mit verwandten Pathogenen und diverse Umweltbedingungen, von denen manche offenkundig eine Saisonalität aufweisen. Um all diese Faktoren durch eine Parametrisierung zu erfassen, die es erlaubte, dem Carrol-Borges-Limit auszuweichen, fehlt bisher jedoch eine hinreichende Datengrundlage.

Fragwürdig an der aktuellen Situation ist nicht nur, dass Modellierungen, die Einfluss auf den politischen Umgang mit COVID-19 ausüben, die Beschäftigung mit solchen Aspekten vermeiden, indem sie globale Annäherungen benutzen, die exponentielles Wachstum unterstellen, sondern auch, dass es von offizieller Seite keine Bemühungen zu geben scheint, entscheidende Parameter durch empirische Forschung, die auch eine, von Anfang an versäumte, breit angelegte Kohorten-Studie umfassen müsste, zu bestimmen.

Eine Invariante des bisherigen Geschehens ist, dass diese Modellierungen sich gegenüber der Realität immer wieder als alles andere denn als Annäherungen erweisen und ihre Autoren zur Erklärung der Differenz von Prognose und Realität nicht mehr einfällt als die Ad-hoc-Hypothese, dass die doch den Erfolg der durch die Regierungen ergriffenen Maßnahmen beweise. Es gibt hier tatsächlich sehr viele *poorly known unknowns*, die für manche Modellierer immer noch *unknown unknowns* zu sein scheinen. Man darf gespannt sein, ob die außerordentlich detaillierte Kritik, die der Astrophysiker Bernhard Müller am aktuellen Stand der Modellierung auf diesem Gebiet vorgelegt hat (vgl. Müller 2021), Früchte trägt. Erschwerend kommt hinzu, dass es hier, anders als bei den Klima- und Wettermodellen, keinen breiten und offenen wissenschaftlichen Diskurs zu geben scheint.

Trotz großer Fortschritte sowohl beim Werkzeugkasten der Modellierung als auch bei der verfügbaren Hardware gibt es nicht nur beharrliche Probleme, sondern auch Hürden, die sich immer höher auftürmen, je mehr man sich ihnen nähert. Letzteres mag daran liegen, dass elaboriertere Modelle mehr Ressourcen verlangen als die Halbleitertechnik, die Kraftwerke und nicht zuletzt die Financiers zu liefern vermögen, doch ist nicht auszuschließen, dass es auch prinzipielle Grenzen gibt. Auf Probleme trifft die immer feinere Ausarbeitung der Modelle, bei der Grenzen des theoretischen Verständnisses auftauchen und selbst, wo diese überwindbar wären, es unmöglich erscheint, die erforderlichen Parameter vollständig und korrekt zu ermitteln. Diese Situation verschärft sich, wenn es nicht um rekurrierende, sondern um neue Phänomene geht und der Einordnung und Prognose nur begrenzte Zeit zur Verfügung steht. Eine Gesellschaft, die, getrieben durch sich auftürmende Problemlagen, zunehmend in die Abhängigkeit von Modellierungen gerät, benötigt nicht zuletzt jedoch vor allem ein geschärftes Bewusstsein und ein vertieftes Verständnis vom epistemischen Status von Modellen, davon, was sie zu leisten vermögen und was nicht, wenn sie nicht den Verlockungen eines billigen Szientismus erliegen möchte. Eine Disziplin der Modellkritik zu etablieren, läge in der Konsequenz dieser Lage.

Literatur

- Bowles, Kenneth L. (1977): *Microcomputer Problem Solving Using PASCAL*. New York u. a. O.
- Dahl, Ole-Johan; Dijkstra, Edsger W.; Hoare, Charles A. R. (1972): *Structured Programming*. London Press.

- Fischbach, Rainer (2020): „Big Data – Big Confusion: Weshalb es immer noch keine künstliche Intelligenz gibt“. Berliner Debatte Initial, 31/1, 136–147. https://www.academia.edu/64910746/Big_Data_Big_Confusion_Weshalb_es_immer_noch_keine_k%C3%BCnstliche_Intelligenz_gibt [27.10.2021].
- Flassbeck, Heiner (2021): „Zu teuer oder zu billig? Eine Analyse der Preisentwicklung von Kraftstoffen“. Relevante Ökonomik, 12. November. – <https://www.relevante-oekonomik.com/2021/11/12/zu-teuer-oder-zu-billig-eine-analyse-der-preisentwicklung-von-kraftstoffen/> [21.01.2022].
- Fuchs-Kittowski, Klaus (2007): „Zur (informatischen) Modellbildung im Methodengefüge der Wissenschaft. Zur revolutionären Rolle der Methoden in der Wissenschaft“. Wissenschaft und Technik in theoretischer Reflexion, hrsg. von Heinrich Parthey; Günter Spur. Frankfurt am Main, 31–78 (Jahrbuch Wissenschaftsforschung Jahrbuch 2006). <http://www.wissenschaftsforschung.de/Jahrbuch2006.pdf> [29.01.2022].
- Kupper, Patrick (2018): „Dennis Meadows et al., Die Grenzen des Wachstums (1972)“. Geschichte des politischen Denkens. Das 20. Jahrhundert, hrsg. von Manfred Brocker. Frankfurt am Main, 548–561. – <https://diglib.uibk.ac.at/download/pdf/4632858?name=Dennis%20Meadows%20u%20a%20Die%20Grenzen%20des%20Wachstums%201972> [21.01.2022].
- Milner, Robin (1978): „A Theory of Type Polymorphism in Programming“. Journal of Computer and System Sciences, 17, 348–375. – <https://doi.org/10.1016%2F0022-0000%2878%2990014-4> [27.10.2021].
- Müller, Bernhard (2021): „Zur Modellierung der Corona-Pandemie – Eine Streitschrift: Addendum zum Thesenpapier 8.0 zur Pandemie durch SARS-CoV-2/Covid-19“. Monitor Versorgungsforschung 14/6. – <http://doi.org/10.24945/MVF.06.21.1866-0533.2354> [27.10.2021].
- Parnas, David Lorge (1972): „On the Criteria to Be Used in Decomposing Systems into Modules“. Communications of the ACM 15, December 12. – <http://dx.doi.org/10.1145/361598.361623> [27.10.2021] (Nachdruck in Hoffman, Daniel M.; Weiss, David M. (eds.): Software Fundamentals. Collected Papers by David L. Parnas. Boston 2001, 551–567).
- Saravanan, Ramalingam (2022): The Climate Demon. Past, Present, and Future of Climate Prediction. Cambridge, MA.
- Stachowiak, Herbert (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien.
- Wirth, Niklaus (1995): „A Plea for Lean Software“. IEEE Computer 28/2, 64–68. – <https://doi.org/10.1109%2F2.348001> [27.10.2021].