

# Wissenssysteme und Komplexitätsbewältigung<sup>1</sup>

Wolfgang Bibel  
Technische Universität Darmstadt

*Nam et ipsa scientia potestas est.*

Francis Bacon (1561–1626)

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wird die These vertreten, dass in der Erforschung komplexer Systeme die erforderliche Balance zwischen Datensammlung und Theoriebildung zu Ungunsten der Theoriebildung gestört ist, und dass Wissenssysteme geeignet sind, diese Balance wieder herzustellen. Zur Vorbereitung der Begründung dieser These werden die Begriffe »Wissen«, »Sprache«, »Logik«, »Wissenssystem« und »Komplexität« im Lichte dieser These einer ausführlichen Erörterung unterzogen. Gründe für den angesichts ihres großen Potenzials eher verhaltenen Enthusiasmus für Wissenssysteme werden ebenfalls angeführt.

## Einleitung

Das Gehirn ist zweifelsohne das komplexeste System, wenn man von dem Gesamtsystem »Welt« einmal absieht. Wegen seiner unglaublichen Komplexität ist die wissenschaftliche Erforschung des Gehirns und seiner phänomenologischen Manifestationen wie Geist, Bewusstsein, Denken und emotionales Empfinden erst in jüngster Zeit ins Zentrum des Interesses gerückt. Dabei werden die folgenden beiden komplementären Ansätze verfolgt.

Im *neurologischen* Ansatz wird quasi die „Maschinerie“ des Gehirns, d.h. seine Strukturen und die darauf ablaufenden Prozesse, studiert. Demgegenüber befasst sich der *kognitiv-phänomenologische* Ansatz mit den vom Gehirn hervorgebrachten Funktionalitäten. Diese lassen sich einerseits von außen mit psychologischen bzw. kognitionswissenschaftlichen Methoden beobachten. Andererseits gibt es wie bei keinem anderen System in diesem Fall dank des Bewusstseins die zusätzliche Möglichkeit der Introspektion. Aus den daraus gesammelten Erfahrungen (Daten) über die Funktionalitäten versucht man dann durch

---

<sup>1</sup> Teile des Inhalts dieser Arbeit entstammen dem unter [www.Intellektik.de](http://www.Intellektik.de) verfügbaren Vortragsmanuskript: Knowledge in IT – absolutely crucial, mostly ignored, Eingeladener Vortrag auf der Conference on Logic and Knowledge, Darmstadt, 14.–16.6.2002.

Theoriebildung Erklärungen der verschiedenen Phänomene zu erlangen, eine Aufgabe, die die Forschung infolge der extremen Komplexität der betreffenden Phänomene vor besondere Herausforderungen stellt.

Mit der Entdeckung des universellen Computers durch Konrad Zuse ist ein Werkzeug auf den Plan getreten, mit dem sich diese Theoriebildung mit Modellierungen auf dem Computer bewerkstelligen ließ, deren Verhalten mit den beobachteten Phänomenen verglichen und den Daten flexibel angepasst werden konnte. Bezüglich des spezifischen Phänomens des Denkens ist damit die Leibniz'sche Vision einer *characteristica universalis* und eines *calculus ratiocinator* in greifbare Nähe gerückt. Nicht zuletzt diese Perspektive führte daher wenige Jahre nach der Entdeckung des Computers, nämlich 1956, zur Gründung der neuen Disziplin „artificial intelligence“ (künstliche Intelligenz, KI), aus der heraus sich später die Kognitionswissenschaft (KW) entwickelte. Weil KI und KW letztlich das gleiche Ziel mit unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen verfolgen, verwendet der Autor für die Disziplin, die aus deren Vereinigung besteht und dem kognitiv-phänomenologischen Ansatz sowie dem komputationalen Paradigma verpflichtet ist, die Bezeichnung *Intellektik*.<sup>2</sup>

Fünfzig Jahre nach ihrer Entstehung kann die Intellektik in allen ihren Bereichen teils spektakuläre Erfolge vor allem auf der von der KI geprägten technologischen Seite aufweisen. Dazu gehören die hier entstandenen Wissenssysteme (auch wissensbasierte Systeme genannt), von denen in diesem Aufsatz die Rede sein soll. Ihr außerordentliches Potenzial in einer Vielzahl von möglichen Anwendungen wird vielfach noch weit unterschätzt, wie nach Einschätzung des Autors in den heutigen Wissenschaften überhaupt das Gewicht zu stark auf die Datensammlung zu Lasten der Theoriebildung – im Sinne der induktiven Erschließung allgemeiner und experimentell nachprüfbarer Gesetze oder Modellierungen – gelegt wird.

Es wird in dieser Arbeit daher die *Forderung* nach einer Wiederherstellung der Balance zwischen Daten und (allgemeinem, gesetzmäßigem) Wissen in den Wissenschaften in Form einer deutlichen Stärkung der Theoriebildung gestellt. Diese Forderung wird ergänzt durch die zentrale *These*, dass das Mittel der Wahl für ihre Erfüllung die Wissenssysteme sind. Vor allem die Theoriebildung über extrem komplexe Systeme wie das Gehirn kann nach unserer Auffassung ohne die Technik der Wissenssysteme nicht gelingen.

Der Aufsatz beginnt mit einer Erörterung des Wissensbegriffs und der Funktion des Wissens für den Menschen. Dabei wird auch die mit dem Wissen evolutionär gekoppelte Sprache und deren Semantik sowie die Frage diskutiert, inwieweit sich Wissen sprachlich repräsentieren lässt. Der zweite Abschnitt behandelt dann die Wissensoperationen, vor allem die Logik und das logische Schließen, die für Wissenssysteme eine grundlegende Bedeutung haben. Dabei weisen wir auf das Babylon logischer Systeme hin, das vermuten lässt, dass die Entwicklung der Logik noch keineswegs abgeschlossen ist. In dieser Entwicklung könnten Wissenssysteme eine wichtige Rolle spielen, die dann im Abschnitt 3 beschrieben werden. Nicht zuletzt erwähnen wir große Wissenssysteme wie CYC. Der Abschnitt 4 beschließt dann die Vorbereitungen durch eine Erörterung des Komplexitätsbegriffs, wobei uns die Komplexität des Klimasystems als Beispiel dient.

Der Abschnitt 5 bringt dann endlich die Begründung der oben genannten Forderung und der damit verbundenen These. Die illustrierenden Beispiele reichen dabei von der Physik über die Klimaforschung bis hin zu den Geistes- und Sozialwissenschaften. Dabei werden auch die Schwächen der Modellierung mittels Differenzialgleichungen erläutert, die Wissenssysteme

---

<sup>2</sup> Eine ausführlichere disziplinäre Einordnung der Intellektik findet sich beispielsweise in dem folgenden Text, der unter [www.Intellektik.de](http://www.Intellektik.de) verfügbar ist: W. Bibel, Mosaiksteine einer Wissenschaft vom Geiste. Eingeladener Vortrag auf der Konferenz über KI und Gödel, Arnoldsheim, 4.–6.4.2003.

eben überwinden könnten. Natürlich stellen die Entwicklung von Wissenssystemen und ihr Einsatz in der Erforschung komplexer Systeme eine große Herausforderung dar. Im abschließenden Abschnitt weisen wir daher auf die Hürden hin, die es zur Bewältigung dieser Herausforderung zu überwinden gilt. Vor allem sind es Hürden gesellschaftlicher Natur, die diese Entwicklung bislang behindern.

Diese Arbeit ist Herrn Klaus Mainzer zu seinem sechzigsten Geburtstag gewidmet. Anders als die große Mehrheit der Philosophen hat er früh die neuen Möglichkeiten ebenso wie die großen Herausforderungen erkannt, die sich mit dem Beginn des Computerzeitalters auch für die Fragestellungen ergeben haben, die einstmals die alleinige Domäne der Philosophie waren.<sup>3</sup> Es wäre sehr zu wünschen, dass sein Beispiel noch mehr Schule machen würde und die Zusammenarbeit der Philosophie mit der Intellektik auch in Deutschland weiter intensiviert werden könnte.

## 1. Wissen und Sprache

»Wissen« ist ein nicht ganz leicht zu definierender Begriff. Er gründet in einer psychologischen Fähigkeit des Menschen, Informationen zu speichern, in Beziehung zueinander zu setzen, zu verallgemeinern und zum Planen künftigen Handelns jederzeit wieder zu aktivieren. Vor allem diese Fähigkeit unterscheidet den Menschen vom Tier. Denn nur der Mensch kann sich aus solchen Informationen ein Modell seiner Umgebung machen, dieses planerisch nutzen und anderen mitteilen. Beispielsweise könnte ich Ihnen meinen Garten so detailliert beschreiben, dass Sie von ihm dadurch eine so genaue Vorstellung bekämen, um ihn im Vorbeigehen oder auch auf vorgelegten Bildern in allen seinen Details identifizieren zu können. Dieses Modell in meiner kognitiven Welt gehört zu meinem Wissen, genauer gesagt, zu meinem *deklarativen* Wissen (beispielsweise über Objekte wie hier dem Garten). Weil diese Kategorie von Wissen kommunizierbar ist, kann es auch als allgemeines Wissen aufgefasst werden. In dieser Vorstellung eines grundsätzlich jedermann zugänglichen Wissens tritt der psychologische Aspekt von Wissen in meiner kognitiven Welt in den Hintergrund; er wird deshalb im Folgenden auch nur mehr eine untergeordnete Rolle spielen.

Dieser Bereich des deklarativen Wissens umfasst weit mehr als Objekt- und Szenenbeschreibungen. Denn aus solchem Wissen können wir induktiv auch generisches (Regel-) Wissen wie beispielsweise „Vögel können fliegen“ oder die Fallgesetze der Physik induktiv erschließen. Auch abstraktes und strukturelles Wissen wie der Satz des Pythagoras in der Geometrie oder irgendein Protokollalgorithmus in der Internettechnologie gehören in diese Wissenskategorie. Ein entscheidendes Merkmal all solchen Wissens ist seine Formulierung auf der Grundlage einer komplexen Struktur von Begriffen, die im Gebiet der Wissenssysteme als *Ontologie* bezeichnet wird. Mensch, Tier, Vogel, Lebewesen sind derartige Begriffe, deren strukturelle Beziehungen darin bestehen, dass alle drei Erstgenannten Lebewesen und Vögel Tiere (aber keine Menschen) sind.

Neben dem deklarativen Wissen gibt es noch den anderen Teilbereich des *Handlungswissens*. Wenn ich beispielsweise Fahrrad fahre oder auf meiner Geige etwa den ersten Satz der Bach'schen E-dur Partita spiele, dann aktiviere ich während dieser Vorgänge ein entsprechendes Handlungswissen. Die technologische Analogie hierzu ist das in einem Roboter implementierte Programm, das dessen Verhalten steuert. Im Gegensatz zu einem solchen Programm, das uns in Form des Programmiercodes ja auch als deklaratives Wissen

---

<sup>3</sup> Unter seinen zahlreichen einschlägigen Werken sei beispielsweise genannt: Klaus Mainzer, KI – Künstliche Intelligenz, Grundlagen intelligenter Systeme, Darmstadt, 2003.

zur Verfügung steht, ist jedoch das menschliche Handlungswissen deklarativ nur unzureichend zugänglich und entsprechend schwierig zu kommunizieren. Wir konzentrieren uns in diesem Aufsatz daher weitgehend auf das deklarative Wissen, das wir im Folgenden kurz als Wissen bezeichnen.

Wissen ist ein geniales Produkt der Evolution. Mit seiner Hilfe gelingt es dem Gehirn, die unvorstellbar große und unstrukturierte Flut von Informationen, die ununterbrochen unsere Sinnesorgane (Sensoren) überschwemmt, in vergleichsweise kleine und strukturierte Portionen zu komprimieren. Wissen ist damit ein entscheidendes, dem Menschen von der Natur gegebenes Werkzeug zur Komplexitätsbeherrschung. Über mehr als hunderttausend Jahre haben sich diese Portionen und ihre Strukturen so herausgebildet, dass sich die Überlebenschancen unserer Spezies verbesserten.

Über die Prozesse im Gehirn bei der Wissensverarbeitung gibt es inzwischen einige rudimentäre Einsichten wie beispielsweise die Tatsache der Beteiligung der Synapsen an der Wissensspeicherung. Die meisten Detailfragen in diesem Zusammenhang sind jedoch noch weitgehend unbeantwortet. Eine detaillierte Modellierung dieser Prozesse im Computer auf der Ebene der biochemischen Prozesse ist daher in absehbarer Zukunft noch nicht in Sicht. Eine solche Modellierung muss daher beim gegenwärtigen Stand der Forschung auf einer deutlich höheren Abstraktionsebene erfolgen, auf der uns phänomenologisch zugängliche Kenntnisse in großer Fülle zur Verfügung stehen.

Diese Kenntnisse sind vor allem darauf zurückzuführen, dass die Evolution mit dem Wissen das Phänomen der *Sprache* als Repräsentations- und Kommunikationsmedium verknüpft hat. Dabei ist Sprache in einem sehr allgemeinen Sinn zu verstehen, der neben der natürlichen Sprache auch formale Sprachen, Gestik, Mimik, Körpersprache, künstlerische Darstellungen usw. umfasst, wobei wir uns in der folgenden Diskussion allerdings weitgehend auf natürliche und formale Sprachen beschränken werden.

Sprachliche Repräsentationen von Wissen sind zunächst *syntaktische* Gebilde, denen jedoch nach dem vorher Gesagten Sinn und Bedeutung, d.h. eine *Semantik* zukommt. Die psychologisch-kognitive Semantik eines sprachlichen Konstrukts wie „mein Garten“ ist meine innere Vorstellung von meinem Garten. Diese Vorstellung bezieht sich wiederum auf den realen Garten an meinem Haus, den man als die *extensionale* oder *Referenzsemantik* zu dem sprachlichen Konstrukt bzw. als seine *Bedeutung* bezeichnet. Seit Frege unterscheidet man hiervon die zusätzliche *intensionale* Semantik oder den *Sinn* des sprachlichen Ausdrucks, der sich auf die innere Struktur der Welt der Begriffe, von der wir schon unter dem Stichwort „Ontologie“ weiter oben gesprochen haben, sowie auf die Beziehungen unter den Zeichen und Teilausdrücken bezieht. Im Beispiel kommt der Sinn von „mein Garten“ im darin ausgedrückten Zuordnungsverhältnis zum Ausdruck. Beide Semantikvarianten werden in der Kindheit gleichzeitig mit dem syntaktischen Spracherwerb erlernt.

Die Bedeutung eines Begriffs ist nicht immer so einfach wie in unserem Gartenbeispiel. Beispielsweise haben wir bereits am Beginn dieses Abschnitts darauf hingewiesen, dass der Begriff „Wissen“ in seiner (extensionalen) Bedeutung nicht leicht festzulegen ist. In einem solchen Fall lässt sich seine Extension mit hinreichenden Bedingungen eingrenzen, aber nicht scharf abgrenzen, sodass unbestimmte Grenzfälle bleiben.

Der so beschriebene Semantikbegriff lässt die eingangs genannte psychologische (kognitive) Vorstellungswelt des einzelnen Menschen völlig **außer acht**. Die damit verbundene Vereinfachung stützt sich dabei auf eine These, die wir als *Sprachbedeutungsthese* bezeichnen wollen. Sie besagt, dass *die Bedeutung eines sprachlichen Ausdrucks von deren kognitiver Vorstellung unabhängig ist und deshalb objektiv definiert werden kann*. Anders ausgedrückt: *Die mit einem Begriff verbundene kognitive Vorstellung ist*

*eine getreue Repräsentation der entsprechenden Bedeutung in der objektiven Welt und damit vernachlässigbar.* Aufgrund der zunehmenden Kenntnisse der Kognitionswissenschaft ist klar, dass diese These nur in erster Näherung gilt, in einer präziseren Analyse aber nicht aufrechterhalten werden kann. Vielmehr wird man in Zukunft zusätzlich zur objektiven Bedeutung in der Welt auch die dazugehörigen kognitiven Vorstellungen und die diese erzeugenden Gehirnzustände in die Betrachtungen über Sprachsemantik miteinbeziehen müssen. Hier öffnet sich ein weites und spannendes Forschungsfeld mit außerordentlich komplexen Problemstellungen, worauf wir nicht weiter eingehen können. Diese bisher unbeachtete verfeinerte Sichtweise ist vor allem durch die Möglichkeit der Repräsentation von Wissen in Computern aktuell geworden, auf die wir in Abschnitt 3 zu sprechen kommen werden.

## 2. Wissensoperationen, Logik und Schließen

Wissen entfaltet seine große Potenz erst durch entsprechende Operationen. Zu den begrifflich einfachsten Wissensoperationen gehören das Speichern von neuem Wissen sowie der Abruf von gespeichertem Wissen. Gleichwohl sind auch sie von einiger Komplexität, spielen doch bei der Speicherung im Hinblick auf andere Operationen auch die inhärenten Wissensstrukturen eine wichtige Rolle. Diese betreffen die Struktur der Begriffswelt (Ontologie), die Bedeutungen (Semiotik) der und die Relationen unter den Zeichen, die Verknüpfungsstruktur zur Bildung komplexer Aussagestrukturen aus Elementaraussagen und alle damit zusammenhängenden Fragen, auf die wir hier nicht näher eingehen können. Vielmehr wollen wir uns stellvertretend ausschließlich auf die logischen Operationen konzentrieren.

Im letzten Abschnitt hatten wir Wissen wegen der damit verbundenen Informationskomprimierung als ein naturgegebenes Werkzeug zur Komplexitätsbeherrschung bezeichnet. Es ist gepaart mit einem weiteren Werkzeug zur Komplexitätsbeherrschung, das ebenfalls auf einer Informationskomprimierung beruht. Wenn man beispielsweise ein Objekt wie etwa einen Vogel wahrnimmt, so erschließen sich mithilfe dieses Werkzeugs unmittelbar eine Reihe von Wissensfakten, die uns explizit in Bezug auf diesen individuellen Vogel vorher nicht bekannt gewesen sein müssen, nämlich dass er wohl ein Gefieder hat, fliegen kann, Nester baut usw. Dieses Werkzeug ist die uns Menschen eigene Logik, auf der die Fähigkeit zum Schließen beruht. Wie das Wissen ist die Logik ein Produkt der Evolution, durch das die Überlebenschancen erhöht wurden, unter anderem weil durch sie der zum Wissensaustausch erforderliche Informationsfluss wesentlich reduziert werden konnte.

Aus kognitiver Sicht beruht die Logik auf dem erstaunlichen Phänomen, dass wir aus dem unserer Vorstellungswelt verfügbaren Wissen  $W_0$  weiteres Wissen  $W_1$  wie im Vogelbeispiel erschließen können.  $W_0$  steht also mit  $W_1$  in einer gewissen kognitiven Relation, die wir mit  $\vdash_k$  bezeichnen wollen, d.h.  $W_0 \vdash_k W_1$ . Es ist diese Relation, die sich evolutionär herausgebildet hat, die wir aber bis heute nicht explizit kennen. Im letzten Abschnitt haben wir nun daran erinnert, dass sich auch die natürlichsprachliche Repräsentation von Wissen evolutionär gebildet hat. Zu  $W_0$  und  $W_1$  gibt es demnach sprachliche Formulierungen  $W_{s0}$  und  $W_{s1}$  und entsprechend eine Relation  $\vdash_s$ , für die  $W_{s0} \vdash_s W_{s1}$  gilt. Zu dieser Relation kennen wir unzählige Beispiele. Es ist das Verdienst der Logiker von mehr als zweitausend Jahren, aus diesem Beispielfundus induktiv eine präzise definierte (semantische) Relation  $\vdash$  für eine abstrahierte Form der natürlichen Sprache, nämlich die Logiksprache, extrahiert zu haben. Auf der Grundlage dieser Präzisierung wurden dann Logikkalküle entwickelt, in denen das

Schließen formal und mechanisch auf der syntaktischen Ebene und mit einer syntaktischen Relation  $\vdash$  modelliert werden kann.

Dieser Abriss der Entwicklung der Logik könnte infolge seiner Kürze den falschen Eindruck erwecken, diese Entwicklung sei erfolgreich abgeschlossen. Sie ist erfolgreich und hat zu einem Logikkern geführt, der wohl auch in Zukunft Bestand haben wird. Darüber hinaus sind aber bis heute noch mehr Fragen offen als beantwortet. Vor allem wird bis heute um die „richtigen“ Relationen  $\vdash_s$  und  $\vdash$  gerungen. Einige Beispiele sollen dies illustrieren.

In der Intellektik wurden die Fragen nach einer geeigneten Logik intensiv untersucht. Dabei ist man zunächst von der Fregeschen Prädikatenlogik als einer Art Standardlogik ausgegangen. Leider ließen sich jedoch viele der Beispiele aus dem alltäglichen Schließen, also der Relation  $\vdash_s$ , jedenfalls nicht unmittelbar mit der prädikatenlogischen Relation  $\vdash$  modellieren. Wir stehen daher heute vor der höchst unübersichtlichen Situation, die von einer großen Vielfalt unterschiedlicher Logiken, wenn auch mit einem gemeinsamen Kern, geprägt ist: Aristotelische Syllogistik, klassische Prädikatenlogik erster und höherer Stufe, konstruktive Logiken wie beispielsweise die intuitionistische Logik, Modallogiken, nichtmonotone Logiken, stochastische Logiken, Aktionslogiken und viele mehr. Dabei besteht jede der Varianten aus vielen Untervarianten, sodass es insgesamt Hunderte von Logiken gibt. Jede dieser Logiken lässt sich zudem in vielfältiger Weise kalkülisieren, sodass wir es insgesamt mit Tausenden von Logikkalkülen zu tun haben. So hatte sich das Leibniz sicher nicht vorgestellt.

Über die Gründe für dieses Babylon an Logiken kann bislang nur spekuliert werden. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass es einfach bis heute nicht gelungen ist, die Relation  $\vdash_k$  adäquat zu formalisieren. Angesichts der Komplexität der zugrundeliegenden Aufgabe, muss dies auch nicht wirklich verwundern. Denn erstens ist  $\vdash_k$  bis heute nicht objektiv zugänglich und damit subjektiven Unwägbarkeiten unterworfen. Zweitens fehlen generelle Einsichten in die Kompatibilität von  $\vdash_s$  mit  $\vdash_k$ . Drittens handelt es sich bei der induktiven Formalisierung von  $\vdash$  aus Einzelbeispielen zu  $\vdash_s$  möglicherweise um eine zu komplexe Aufgabe, um mit den bisher dabei verwandten Mitteln des individuellen Nachdenkens überhaupt gelöst werden zu können.

Unter diesen drei angegebenen Gründen handelt es sich bei den ersten beiden um Aufgabenstellungen für die Kognitionsforschung. Bis zu einer künftigen Klärung dieser Aufgaben bietet sich auch hier eine abgeschwächte Form unserer im ersten Abschnitt formulierten These an, die wir *strukturelle Sprachbedeutungshypothese* nennen wollen: *Die logischen Strukturen in sprachlichen Ausdrücken sind von deren kognitiver Vorstellung unabhängig und können deshalb objektiv definiert werden.*

Die Richtigkeit dieser These entspricht evolutionärer Logik und erscheint deshalb sehr überzeugend. Die These besagt beispielsweise, dass sprachlich formulierte logische Schlüsse, deren Korrektheit objektiv nachweisbar ist, immer automatisch mit der kognitiven Logik kompatibel sind. Kurz, bezüglich der Logik bildet die natürliche Sprache eine verlässliche Grundlage.<sup>4</sup> Dies mag auch dann noch gelten, wenn für die darin enthaltenen Elementaraussagen sich die volle Sprachbedeutungsthese aus dem ersten Abschnitt als nicht haltbar erweist.

---

<sup>4</sup> Nicht zuletzt im Sinne dieser Überzeugung hat der Autor jüngst eine Transitionslogik entwickelt, die Transitionen bzw. Aktionen wie in der natürlichen Sprache auf gleicher Ebene wie die logischen Operationen repräsentiert: „Transition Logic Revisited“, zur Veröffentlichung eingereicht, 2003 (unter [www.Intellektik.de](http://www.Intellektik.de) verfügbar).

Unter der Annahme dieser strukturellen These erscheint es aussichtsreich, die Definition einer Logikrelation  $\models$  mit Theoriebildungsverfahren der Intellektik aus großen sprachlich formulierten Beispielmengen automatisch zu erschließen – aus heutiger Sicht ein vielleicht noch visionär erscheinendes Zukunftsprojekt. Wie aber sonst ließe sich das heutige Babylon an Logiken überwinden?

Der mögliche Eindruck aus dieser Einschätzung der heutigen Situation in der Logik muss allerdings noch etwas relativiert werden. Denn die gegenwärtige Situation ist nicht ganz so unübersichtlich, wie es dem Leser nun erscheinen mag. Wir hatten ja bereits darauf hingewiesen, dass alle Logikvarianten in einem gemeinsamen Kern übereinstimmen, auch wenn dieser Kern nicht präzise greifbar ist. Die „Strenge Logik“ von Walther Brüning<sup>5</sup> stellt beispielsweise einen Versuch in Richtung auf die Begründung eines solchen Kerns dar. Für die Zwecke dieser Arbeit ebenso wie für die Thematik des nächsten Abschnitts erscheint die Vorstellung der Prädikatenlogik erster Stufe als dieser Kern als nicht ganz untauglich (auch wenn Brüning dem nicht zustimmen würde).

### 3. Wissenssysteme

Der bereits in der Einleitung erwähnten Entdeckung des Computers wurde durch die fundamentalen Ergebnisse der Logikforschung aus der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts der Boden bereitet. Es ist daher kein Zufall, dass sich von Anfang an eine Reihe von Logikern mit den Möglichkeiten dieses neuen Werkzeugs intensiv befasst hat.<sup>6</sup> Vor allem zielten die Bemühungen auf die Automatisierung des Schließens sowie die Repräsentation und Verarbeitung von Wissen im Computer. Im Zuge dieser Bemühungen sind viele der Einsichten zu Wissen und Logik entstanden, von denen in den vorangegangenen beiden Abschnitten die Rede war.

So entstanden im Verlauf der letzten fünfzig Jahre auch eine Vielfalt von Inferenzsystemen zur Modellierung des Schließens und von Wissenssystemen zur Repräsentation und Verarbeitung von Wissen, wobei letztere jeweils ein Inferenzsystem als Modul beinhalten. Solche Systeme, zu denen es eine umfangreiche Literatur gibt,<sup>7</sup> stehen im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit. Ein Beispiel eines solchen Systems ist *CYC*, das unter der Leitung von Doug Lenat in Austin, Texas, entwickelt wird.<sup>8</sup> Es ist das größte existierende Wissenssystem und umfasst inzwischen Millionen von Fakten und Regeln des alltäglichen Wissens wie: „Glas ist zerbrechlich“, „zerbrechliche Gegenstände brechen, wenn man sie fallen lässt“, „Kaffee in einer Tasse schwappt über, wenn man die Tasse nicht aufrecht hält“, usw. usf. Ein weiteres Beispiel ist das von Paul Allen, dem Mitbegründer der Fa. Microsoft, finanzierte *Halo* Projekt, das auf die Entwicklung eines „digitalen Aristoteles“ zielt, in dem schließlich das gesamte wissenschaftliche Wissen verfügbar sein soll. Die in Halo partizipierenden Konkurrenten konnten schon nach relativ kurzer Entwicklungszeit erstaunliche Leistungen der Wissensverarbeitung vorweisen. Neben diesen spektakulär herausragenden Systemen gibt es weltweit buchstäblich Zigtausende von Systemen dieser Architektur, die oft in Standardumgebungen der Softwaretechnik eingebettet sind und daher meist recht wenig

---

<sup>5</sup> Walther Brüning, *Grundlagen der Strengen Logik*, Verlag Königshausen und Neumann, Würzburg, 1996.

<sup>6</sup> Wolfgang Bibel, *Early History and Perspectives of Automated Deduction*, Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual German Conference on Artificial Intelligence (KI-2007), September 10–13, Osnabrück, LNAI, Springer, Berlin (2007).

<sup>7</sup> Mark Stefik, *Introduction to Knowledge Systems*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1995. Siehe z.B. auch: Bruce G. Buchanan, *What Do We Know about Knowledge?*, *AI Magazine* 27(4), 35–46, 2006.

<sup>8</sup> Douglas B. Lenat, *CYC: A Large-Scale Investment in Knowledge Infrastructure*, *Communications of the ACM*, 38(11), November 1995, 33–38.

Aufsehens von sich machen. Kurz, die Technik der Wissenssysteme ist inzwischen etabliert und verbreitet, wenn auch weit unter ihrem potenziellen Niveau.

Wissen Wissenssysteme wirklich etwas? Zunächst muss ein mögliches Missverständnis ausgeräumt werden. Im Kontext des worldwide web (WWW) wird ja auch davon gesprochen, dass bereits heute unvorstellbare Wissensmengen jederzeit verfügbar seien. Hier handelt es sich beim gegenwärtigen Stand des WWW *nicht* um ein Wissenssystem, sondern lediglich um ein Textspeicherungssystem mit statistisch gesteuerten Zugriffsmöglichkeiten auf Stichworte. Fragt man das Suchsystem Google beispielsweise nach dem „Geburtsdatum von Ulrich Furbach“, so ist das Suchergebnis eine Liste von Texten, in denen alle oder manche der Stichworte „Geburtsdatum“, „Ulrich“ und „Furbach“, ggf. auch in Variationen wie „Geburtsort“ auftreten. Darunter sind dann so „hilfreiche“ Texte wie das Kösliner Amtsblatt von 1835, in dem zufällig der Name „Furbach“ und an anderer Stelle das Wort „Geburtsort“ erwähnt werden. Die Antwort auf meine Anfrage findet sich jedoch nicht darunter, weil das System meine Anfrage semantisch überhaupt nicht „versteht“ und daher auch nicht wirklich irgend etwas *weiß*.

Wissenssysteme unterscheiden sich im Gegensatz zu diesen Systemen des *Wissensmanagements* grundsätzlich dadurch, dass sie wie Menschen erkennen, dass hier nach dem Datum der Geburt einer bestimmten Person und nicht nach einer eingeschränkten Anzahl von Texten gefragt wird. Durch Kenntnisse zu den hier genannten Begriffen sind sie zu natürlichen Schlussfolgerungen und damit zu einer nutzbringenden Aktivierung des Wissens fähig.<sup>9</sup> Es sei nebenbei darauf hingewiesen, dass derzeit unter der Thematik „semantisches Web“ bereits erhebliche Anstrengungen gemacht werden, den Suchmaschinen im WWW einige dieser Fähigkeiten auch beizubringen, d.h. sie als echte Wissenssysteme zu konzipieren.<sup>10</sup>

Ermöglicht werden diese Fähigkeiten durch die Formalismen der Wissensrepräsentation und Inferenz, auf die wir im Einzelnen hier nicht eingehen können.<sup>11</sup> Es sei nur soviel angedeutet, dass heute bei der Repräsentation von Wissen eine komplexe Ontologie von Begriffen als Grundlage dient, von der schon im ersten Abschnitt kurz die Rede war. Auch spielt vor allem für die Effizienz des Inferenzprozesses die Repräsentationsstruktur des gespeicherten Wissens eine entscheidende Rolle. Diese Strukturen spiegeln u.a. die sprachlogischen Strukturen wider. Selbstverständlich ist alles mathematisch präzise definiert.<sup>12</sup> Dies gilt auch für die den menschlichen Begriffen meist innewohnende Unschärfe sowie deren Kontext. Auch Unschärfe lässt sich präzisieren und Kontext explizit machen. Das Charakteristische eines Wissenssystems ist seine Inferenzfähigkeit, wobei wir hier unter

---

<sup>9</sup> Interessanterweise gibt es auch unter Menschen sogenannte „Savants“, die zwar über ein nahezu unerschöpfliches Wissensreservoir verfügen, beispielsweise ganze Lexika im Kopf haben, gleichwohl in Ermangelung einer entsprechenden Inferenzfähigkeit zur Aktivierung dieses Wissens nicht fähig sind und kaum mehr damit anfangen können, als andere Menschen zu beeindrucken bzw. Neurowissenschaftlern als Studienobjekte zu dienen.

<sup>10</sup> Wolfgang Wahlster, Die semantische Wende in der Informatik, Festvortrag zum Abschluss des Informatikjahres 2006, Congresszentrum Berlin, 18.12.2006.

<sup>11</sup> Siehe z.B. Wolfgang Bibel, Steffen Hölldobler, Torsten Schaub, Wissensrepräsentation und Inferenz, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1993.

<sup>12</sup> In dieser Hinsicht unterscheidet sich die Intellektik vorteilhaft von einer ihrer Vorläuferinnen, der Philosophie, die so „präzise“ Definitionen wie etwa die folgende offenbar bis heute toleriert: „Wissen ist die Teilhabe am Sosein eines Seienden“ (Max Scheler, 1874–1928). Auch der Kontext, in dem Scheler diese „Definition“ schrieb, macht sie für eine Disziplin mit dem Anspruch der Wissenschaftlichkeit nicht akzeptabler.

diesem Begriff auch solche Systeme subsumieren wollen, die mittels induktiver Inferenz aus Datenmengen Theorien extrahieren (datamining, maschinelles Lernen, Theoriebildung).<sup>13</sup>

Man hat abgeschätzt, dass der Mensch über ein Wissen in der Größenordnung von einhundert Millionen Einheiten (etwa Satzaussagen) verfügt. Auch wenn CYC erst einige Prozent dieser Größenordnung enthält, ist aufgrund der sich ständig beschleunigenden Technologieentwicklung absehbar, dass es Wissenssysteme mit einem solchen Umfang in absehbarer Zeit geben wird. Stellen wir uns für die folgende Diskussion derart ausgereifte Wissenssysteme vor, die beispielsweise auch Wissen über ihr Wissen haben, sodass sie Grenzen ihres Wissens erkennen und diese Erkenntnis wie Menschen in ihrem Verhalten berücksichtigen. Werden dann derartige Wissenssysteme etwas wissen?

Sie werden sich jedenfalls verhalten wie Menschen und etwa auf die Frage nach dem Geburtsdatum eines Kollegen eben dieses Datum zur Antwort geben oder im Falle der Unkenntnis im Web die entsprechende Information ausfindig zu machen versuchen. In diesem Sinne werden sie in der Lage sein, das Wissensverhalten von Menschen weitestgehend zu modellieren.

Gleichwohl bleibt naturgemäß ein Unterschied. Dieser besteht in erster Linie im Fehlen kognitiver Vorstellungen, von denen in den letzten beiden Abschnitten die Rede war. Nur wenn die Sprachbedeutungsthese des ersten Abschnitts Gültigkeit hätte, wäre dieser Unterschied bedeutungslos. Wie dort bereits gesagt, erscheint dies aber eher als unwahrscheinlich.<sup>14</sup> Solange wir aber keine tieferen Einblicke in diese kognitiven Phänomene einschließlich des Bewusstseins haben, werden wir mit diesem Unterschied leben müssen. Der große Nutzen von Wissenssystemen ist davon sicher nicht tangiert, vor allem wenn sich die strukturelle Sprachbedeutungshypothese des zweiten Abschnitts als richtig herausstellt, wovon wir überzeugt sind. Denn dann beschränkt sich der Unterschied auf die Elementarvorstellungen und bezieht sich nicht auf das strukturelle Geflecht ihrer Zusammenhänge, die dann von den Wissenssystemen korrekt modelliert sind, vorausgesetzt es gelingt uns, all die anderen in den vorausgegangenen beiden Abschnitten genannten Probleme vollständig zu lösen.

Auch in Bezug auf die Elementareinheiten des Wissens lassen sich Schritte hin zu einer Approximation kognitiver Vorstellungen gehen. Mit Sensorik ausgestattete Robotersysteme lassen sich schon heute so realisieren, dass sprachliche Ausdrücke im Sinne der im ersten Abschnitt beschriebenen Referenzsemantik mit entsprechenden sensorischen Zuständen assoziiert werden. Bildlich gesprochen heißt das, dass ein Ausdruck wie „mein Garten“ im System gleichsam mit verschiedenen Bildern des Gartens assoziiert wird, so wie ich in meiner Vorstellung Bilder dieses Gartens abrufen kann. Es ist daher durchaus vorstellbar, dass diese semantischen Assoziationen zu sprachlichen Begriffen in künftigen Systemen eine wichtige und mannigfaltige Rolle spielen werden und dadurch das den Systemen innewohnende „Wissen“ dem Wissen in unseren kognitiven Vorstellungen noch ein Stück näher rückt. Schließlich ist auch nicht ausgeschlossen, dass irgendwann einmal sogar Systeme mit Bewusstsein geben wird.<sup>15</sup>

---

<sup>13</sup> Das folgende Buch bietet eine umfassende Einführung in die genannten und viele weitere Forschungsbereiche: Stuart J. Russell, Peter Norvig, Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz, 2. Auflage, Pearson Education Upper Saddle River, N.J., 2004.

<sup>14</sup> Man kann vermuten, dass künstlerische Arbeiten sich mit diesem „Mehrwert“ kognitiver Vorstellungen gegenüber sprachlichen Formulierungen auseinandersetzen.

<sup>15</sup> Thomas Metzinger, Eine neue Vision für die KI – Bewusstes Erleben, das phänomenale Selbstmodell und die subjektive Innenperspektive als Formen intelligenter Informationsverarbeitung, KI 4/06, 43–46, 2006.

## 4. Komplexität

Der Begriff der Komplexität ist ähnlich vielgestaltig wie der des Wissens. Bevor wir daher über die Komplexität im Kontext von Wissenssystemen im nächsten Abschnitt zu sprechen kommen, empfiehlt es sich, den Begriff etwas näher zu beleuchten.

Die präzisesten Komplexitätsbegriffe, nämlich die *Algorithmen-* sowie die *Datenkomplexität*, werden in der Informatik verwendet. Die Komplexität eines Algorithmus misst dessen Aufwand bei der Lösung eines Problems in Abhängigkeit des Problemumfangs, während die Datenkomplexität den Informationsgehalt angibt, wofür es unterschiedliche Ansätze (von Shannon, Kolmogorov u.a.) gibt. Beide Begriffe spielen in unserem Kontext eine nicht unwesentliche Rolle. So weisen die in der Wissensverarbeitung verwandten Algorithmen teilweise (z.B. die Inferenzalgorithmen) eine sehr hohe Komplexität auf und stellen insoweit eine große Herausforderung dar. Auf die Datenkomplexität haben wir indirekt bereits in den Abschnitten 1 und 2 Bezug genommen, als wir auf die Informationskomprimierung durch die Sprache sowie die Logik verwiesen haben, die mit einer Reduktion eben dieser Komplexität verknüpft ist.

Eine andere Variante des Komplexitätsbegriffs findet in der Systemtheorie Anwendung, der jedoch nicht so exakt definiert ist wie in der Informatik. Grob gesagt sind danach Systeme *komplex*, wenn sie vielschichtig sind und sich der Vereinfachung entziehen. Beispiele sind das menschliche Gehirn, der Körper mit all den darin ablaufenden Prozessen, ja eine einzelne Zelle samt ihrer Prozesse, die Biosphäre, das System des Erdklimas oder die Weltwirtschaft. Die Charakterisierung des Begriffs der komplexen Systeme erfolgt in der Systemtheorie mittels einer Reihe von Eigenschaften, deren Vorliegen die Komplexität begründet. Beispiele solcher Eigenschaften sind die Nichtlinearität der Wirkungszusammenhänge der Systemkomponenten, die Emergenz von Eigenschaften (wie etwa dem Bewusstsein), die sich auf einer Systemebene durch Wechselwirkungen auf einer anderen Ebene ergeben.

Wenn in diesem Band von Komplexitätsherausforderungen die Rede ist, so zielt diese Thematik auf die Komplexität von wissenschaftlichen Herausforderungen. Der dabei ins Auge gefasste Komplexitätsbegriff ist bislang nicht genauer umschrieben worden. Auch wir wollen hier keine Präzisierung versuchen, sondern unsere Vorstellungen dazu lediglich mit einigen Aspekten erläutern.

Wissenschaft zielt auf ein rationales Verständnis der Welt, um das Überleben so gut wie irgend möglich gestalten und sichern zu können. Beispielsweise steht die Menschheit derzeit vor der vitalen Frage, ob und wie ihr Wirken das Klima beeinflusst. Ein ungünstiger Verlauf der künftigen Klimaentwicklung könnte das Überleben von vielen Menschen gefährden. Also versucht man, das Klimageschehen so zu verstehen, dass man eventuelle Verursachungen solcher Veränderungen vermeiden könnte. Diese Zielsetzung ist in vielfältiger Hinsicht extrem komplex. Wir wissen bislang nur recht fragmentarisch, welche Phänomene überhaupt an der Gestaltung des Klimas beteiligt sind. Natürlich sind dies die Sonne, die Weltmeere, die Schnee- und Eisflächen, die Urwälder, die Bestandteile der Atmosphäre, die Wolkenbildung aufgrund von Aerosolen usw. usf. Niemand kennt jedoch alle Komponenten, die hieran messbar beteiligt sind. Mit anderen Worten, das System Klima ist nicht einmal bezüglich seiner beteiligten Komponenten bekannt geschweige denn, dass wir die Wirkungszusammenhänge all dieser Komponenten verstehen würden. Denn jede der wenigen genannten Komponenten ist, wie beispielsweise das Meer, selbst wieder ein komplexes System, dessen Verhalten viele Rätsel aufgibt. Kurz, wir kennen nicht einmal die genaue Aufgabenstellung, die sich im Hinblick auf eine solche wissenschaftliche Zielsetzung stellt.

Was hier anhand der Klimaforschung gesagt wird, gilt für viele andere Bereiche wie etwa die oben genannten Beispiele komplexer Systeme analog. Ein weiteres Beispiel daraus wäre etwa die Erforschung des Gehirns und seiner phänomenologischen Eigenschaften wie Intelligenz, Bewusstsein usw. Das „Stochern im Nebel“ charakterisiert die in diesen Beispielen auftretende Art von Komplexität, die mit keinem der oben genannten Komplexitätsbegriffe ausreichend abgedeckt ist. Ihre Struktur und Wirkungsmechanismen sind so komplex und undurchsichtig, dass es noch nicht einmal gelingt, die richtigen Fragen zu stellen, geschweige denn Antworten darauf geben zu können.

## 5. Wissenssysteme zur Komplexitätsbewältigung

Die Erforschung komplexer Systeme wie das Klima, das Gehirn oder die Gesellschaft ist heute vor allem dominiert von einer extensiven Fokussierung auf das Sammeln von Daten. Bis zu einem gewissen Grad ist dies auch gerechtfertigt, geht doch jeder Theoriebildung die Datensammlung voraus. Wir vertreten hier jedoch die These, dass in der heutigen Wissenschaft die vormalige Balance zwischen den Aufwänden für das Datensammeln einerseits und die Theoriebildung andererseits zu Ungunsten der Theoriebildung abhanden gekommen ist. Das Datensammeln ist zur Manie entartet. Vor allem in den Geistes- und Sozialwissenschaften steht es im Zentrum wissenschaftlicher Aktivität.

Eine Erklärung für dieses Phänomen ist der folgende Sachverhalt. Die untersuchten Systeme übersteigen in ihrer Komplexität jegliches menschliche Vorstellungsvermögen sowohl hinsichtlich der Masse an Daten wie auch der Herausforderung, auf der Grundlage der verfügbaren Daten Theoriebildung zu betreiben. Die Informationstechnologie (IT) ermöglicht nun aber die Verarbeitung nahezu unbegrenzter Datenmengen und löst somit die eine Hälfte des Problems. Zudem geht man von dem im Prinzip richtigen Grundsatz aus, dass durch die Zunahme an relevanten Daten die Theoriebildung erleichtert wird. Also sammelt man in allen Wissenschaften immer fleißiger Massen von Daten.

Während die IT das Datensammeln beispielsweise durch die Automatisierung der Messvorgänge und durch die modernen Speichermedien substanziell unterstützt, ist die Theoriebildung noch immer ausschließlich dem Menschen vorbehalten. Insoweit die Theoriebildung die menschlichen Fähigkeiten der Abstraktion und Induktion übersteigt, gilt der erwähnte Grundsatz offenbar nicht mehr, denn auch noch so viele weitere Daten haben keinen Einfluss auf die menschlichen Theoriebildungsfähigkeiten. Die andere Hälfte des Problems bleibt also nach wie vor ungelöst. Das Problem verschärft sich bei einer anwachsenden Datenmenge sogar weiter, da diese nur durch abstrahierende Modellierungen bzw. Theoriebildung überschaubar wird. Wir kommen hier nur dann weiter, wenn nicht nur das Datensammeln, sondern auch die Theoriebildung technologisch substanziell unterstützt wird. Die Technologie hierfür steht in Form der Wissenssysteme zur Verfügung, wird aber bis heute in dieser Rolle nicht wirklich eingesetzt.

Bevor wir auf dieses große Potenzial für die Wissenschaftsentwicklung eingehen, sei kurz erläutert, welche Form der Theoriebildung in derart komplexen Systemen bislang üblich ist, sofern sie überhaupt stattfindet. Das Mittel der Wahl hierfür sind vor allem Differenzialgleichungen, mit denen das Verhalten dynamischer Systeme modelliert wird. Beispielsweise wird das Klima mathematisch mittels eines gekoppelten Systems von nichtlinearen partiellen und gewöhnlichen Differenzialgleichungen sowie von algebraischen Gleichungen modelliert, die dann unter erheblichem Aufwand an Rechenleistungen zur Berechnung der funktionalen Abläufe simultan numerisch integriert werden. Die Werte der in den Gleichungen auftretenden Parameter werden dabei durch den Vergleich mit bereits

bekannten Klimaverläufen bestimmt. Beispielsweise ist *Ensemble* ein europäisches Projekt mit dem Ziel der Modellierung des globalen Klimas auf diese Art und Weise.

Diese Methode hat sich in der kurzfristigen Wettervorhersage von bis zu einer Woche als außerordentlich erfolgreich erwiesen, während Vorhersagen weit darüber hinaus nach wie vor äußerst unzuverlässig sind. Woran mag diese Unzuverlässigkeit in diesem wie in vielen anderen Beispielen liegen?

Die Schwächen des hier verfolgten methodologischen Ansatzes sind eigentlich offensichtlich. Wir haben bereits im letzten Abschnitt auf einige am Klimageschehen beteiligte Phänomene sowie auf die Unkenntnis bezüglich der Wirkungszusammenhänge dieser Komponenten hingewiesen. Die in den Modellierungsgleichungen auftretenden Funktionen sind daher, insoweit sie solche Zusammenhänge zu modellieren versuchen, höchst spekulativ. Weiter ist die Modellierung mit Sicherheit insoweit völlig unzureichend, als ja bei weitem nicht alle wichtigen Wirkungskomponenten bekannt sind. Schließlich ist die Repräsentation von Wissen in Form von Differenzialgleichungen so unanschaulich, dass bei dieser Art von Modellierung große Mengen an konkreten Kenntnissen unberücksichtigt bleiben müssen, weil man nicht weiß, wie sie in diesem mathematisch-funktionalen Kontext eingebaut werden können. Vor allem der letzte dieser drei Punkte deutet auf eine grundsätzliche **methodische** Schwäche des bislang verfolgten Ansatzes hin, weshalb dieser noch etwas weiter erläutert werden soll.

Jeder kennt eine Reihe von Wetterregeln wie etwa, dass ein Abendrot einen schönen nächsten Tag ankündigt. Genau betrachtet besteht unser gesamtes kommunizierbares Wissen über das Wettergeschehen aus solch regelartigem Wissen, das Daten und Fakten als Spezialfälle umfasst. Der westafrikanische Monsun – um ein weiteres wissenschaftlicheres Beispiel anzuführen – wird durch den starken Temperaturunterschied zwischen dem kühleren Atlantik und dem heißen afrikanischen Kontinent ausgelöst, weil dessen Luft eine viel geringere Dichte aufweist; zu den vielen weiteren daran beteiligten Wirkungszusammenhängen gehört beispielsweise auch der Einfluss des El Niño Phänomens im fernen Pazifik. Beide Aussagen lassen sich unter Berücksichtigung weiterer dabei wirksamer Details noch präziser als Regeln oder Gesetzmäßigkeiten ausdrücken und formal repräsentieren. Unsere Kenntnisse allein auf dem klimatologischen Gebiet bestehen mutmaßlich aus Zigtausenden von derartigen Regeln und Fakten. Niemand kann sie alle im Kopf haben und bei der Aufstellung von Differenzialgleichungen in irgendeiner Weise mit einbringen. Dieses Wissen und die Gleichungen bilden also zwei weitgehend voneinander getrennte Welten; die Gleichungen repräsentieren keineswegs das vorhandene Wissen in einer auch nur annähernd vollständigen und korrekten Weise.

Ein methodisch erfolgversprechenderer Ansatz bestünde daher in einem Verfahren, das die *Modell- bzw. Theoriebildung direkt aus dem vorhandenen Wissen und den verfügbaren Daten* bewerkstelligt. In weniger komplexen Aufgabenstellungen wird genau dieses Verfahren von Wissenschaftlern direkt geleistet. In Fällen jedoch, in denen die Komplexität die Fähigkeiten der Menschen übersteigt, muss dieses Verfahren anders realisiert werden. Alles spricht hier für einen methodischen Zugang mithilfe von Wissenssystemen, weil sie genau die klaffende Lücke schließen könnten.

Ein System der Art, wie sie uns vorschwebt, würde induktiv aus den vorhandenen Daten Wissen (in Form erkannter Gesetzmäßigkeiten) derart extrahieren, dass dieses mit dem bereits gegebenen Wissen im Einklang steht. So entstünde insgesamt ein Wissenssystem, mit dessen Inferenzmechanismus Probleme gelöst sowie Prognosen, aber auch Erklärungen abgeleitet werden könnten, was zum Standardrepertoire von Wissenssystemen gehört. Ein solches Wissenssystem kann durchaus *auch* Wissen in Form von Differenzialgleichungen zur

Beschreibung von Teilsystemen beinhalten, deren Wirkgefüge bereits weitgehend verstanden ist. Denn wie jede Gleichung ist auch eine Differenzialgleichung ein Wissensfakt und deren mathematische Auflösung kann in den Inferenzprozess (technisch auf der Unifikationsebene) eingebaut werden. Wissenssysteme sind daher in der Lage, die beiden genannten Welten nahtlos miteinander zu verbinden.

Etwas konkreter beschrieben würde man zunächst beispielsweise nach dem Prinzip der Wikipedia alles verfügbare Wissen zu dem betreffenden Gebiet wie etwa dem Klima im System sammeln. Dies könnte in natürlicher Sprache geschehen, weil die Transformation auf eine formale Sprache heute im Gebiet der Sprachverarbeitung relativ gut beherrscht wird; die Eingabe dürfte aber auch mathematisch formulierte Zusammenhänge beinhalten. Nach der Transformation der gesamten Wissensbasis in eine einheitliche formale Repräsentation läßt sich die entstandene Wissensbasis auf Inkonsistenzen hin untersuchen. Auf das so entstandene Wissensgebilde würden (ggf. entsprechend weiterentwickelte) Theoriebildungsalgorithmen angewandt, wobei der Mensch durchaus mit einbezogen werden sollte. Die sich auf diese Weise ergebenden Theorien bilden selbst wieder Wissen, das in die Wissensbasis zusätzlich mit aufgenommen werden kann. Die so erzielte Wissensbasis würde dann die Grundlage für das Lösen von Problemen, die Ableitung von Erklärungen für beobachtete Phänomene oder die Erstellung von Prognosen bilden. Aus dem Abgleich letzterer mit neu anfallenden Daten können sich dann Revisionen der Wissensbasis ergeben, mit denen der Zyklus von neuem beginnt. Es ist in absehbarer Zukunft beispielsweise beim Klima durchaus auch denkbar, aus den an unzähligen Meßstellen täglich gesammelten Daten mittels eines entsprechenden Datamining Moduls weiteres Wissen zu extrahieren und direkt in die Wissensbasis einzuspeisen, um den Theoriebildungszyklus so noch weiter zu beschleunigen und zu verfeinern.

Ein besonderes Charakteristikum von Wissenssystemen ist ihre Brauchbarkeit in *jedem* Stadium der Entwicklung (engl. anytime system). Im Gegensatz zu konventionellen Softwaresystemen sind sie zudem additiv, d.h. sie erlauben die Hinzufügung weiteren Wissens ohne jeglichen Eingriff in die bisherige Systemstruktur, was in der gegebenen Systemskizze extensiv ausgenutzt wurde. Bei dem im letzten Abschnitt genannten „Stochern im Nebel“ leisten gerade diese Eigenschaften im Sinne einer kontinuierlich fortgesetzten Theorieentwicklung unersetzliche Dienste, die bei Modellierungen mittels Differenzialgleichungen völlig undenkbar wären.

Wünschenswert wäre dann zusätzlich, quasi in Form einer „Kompilierung“ das entstehende Wissenssystem in ein gleichwertiges Gleichungssystem der oben beschriebenen Art zu überführen, um mit dem Ergebnis ein möglicherweise *effizienteres* Werkzeug an die Hand zu bekommen. Dann aber wären, anders als vorher, in dem resultierenden Gleichungssystem durch die vorangegangene Verbindung das gesamte verfügbare Wissen berücksichtigt und die darin auftretenden Funktionen wohl begründet. Noch besser wäre eine Kompilierung des Wissenssystems direkt in eine Lösungsfunktion ohne Umweg über Differenzialgleichungen und deren numerischer Lösung. Da jedes Wissenssystem einen funktionellen Zusammenhang zwischen den als Ein- und Ausgabe deklarierbaren Parametern definiert, ist dies grundsätzlich in jedem Fall möglich. Mit einer derartigen Kompilierung betreten wir allerdings teilweise unbetretenes wissenschaftliches Neuland, weshalb betont sei, dass auch ohne diese zusätzliche Kompilierung das Wissenssystem allein alle erwünschten Dienste bieten könnte, wenn auch möglicherweise in weniger effizienter Weise.

Wir haben das attraktive Potenzial von Wissenssystemen anhand der Klimamodellierung illustriert, für die es ja zumindest bereits mathematische Modelle gibt. Noch hilfreicher wäre ihr Einsatz in Bereichen, wo präzise Modellierungen überhaupt noch nicht üblich sind. Hierzu

gehören vor allem die Bereiche aus den Geistes- und Sozialwissenschaften (Wirtschaft, Gesellschaft, Recht usw.). Dort bestehen „Modelle“ und „Theorien“ bis heute aus informellen Texten (zuweilen zweifelhaften Inhalts<sup>16</sup>), weshalb man hier auch gerne von *weichen* Wissenschaften spricht und diese mit den methodologisch *harten* Naturwissenschaften kontrastiert. Die Präzisierung des Gehalts dieser Texte würde einen Quantensprung auf dem Weg hin zu Wissenschaften mit echter, experimentell überprüfbarer Theoriebildung wie in den Naturwissenschaften bedeuten. Zum ersten Mal würde dadurch klar erkennbar, dass in diesem Bereich ein generelles Defizit an Theoriebildung herrscht. So handelt es sich zum Beispiel in einem so groß angelegten europäischen Forschungsnetzwerk wie der Marie-Curie-Maßnahme *European Protest Movements since the Cold War*,<sup>17</sup> an dem vierzig Forscher der Geistes- und Sozialwissenschaften aus Europa und den Vereinigten Staaten beteiligt sind, auch hier zu einem viel zu hohen Prozentsatz ausschließlich um das Sammeln von Daten und deren Formulierung in Texten. Es ist nicht einmal klar, welche Art von Theorie dabei angestrebt werden könnte, deren Anwendung Nutzen in der Zukunft und einen ähnlichen Gewinn bringen könnte, wie es naturwissenschaftliche Theorien tun. Der Wert der damit einhergehenden Bewusstmachung der – gern durch statistische Datenerhebungen – gesammelten Fakten in der Gesellschaft ist zwar unbestritten, sollte aber einem echten Wissenschaftler als Ergebnis seiner Arbeit nicht ausreichen. Denn erst in der Generalisierung als Wissen entfalten Daten ihre Macht, wie Francis Bacon in dem eingangs genannten Zitat bereits vor gut vierhundert Jahren festgestellt hat.<sup>18</sup>

Unter den Sozialwissenschaften bietet sich die juristische Disziplin ganz besonders als Anwendungsgebiet von Wissenssystemen an, wie in einer Arbeit des Autors ausführlich dargelegt wurde.<sup>19</sup> Aber auch in den Naturwissenschaften besteht dafür ein großes Potenzial. Beispielsweise ringt die Physik um die Vereinheitlichung der Schwerkraft mit den anderen bekannten Kräften (Elektromagnetismus, starke und schwache Wechselwirkung) bzw. der Allgemeinen Relativitätstheorie mit der der Quantentheorie. Auch wenn unter den Physikern jetzt die spekulative Überzeugung vorherrscht, mit der String- bzw. M-Theorie eine Lösung gefunden zu haben, wäre es überzeugender, aus den bisher gewonnenen Massen an Daten aus Experimenten in den bekannten Beschleunigern (Cern, Desy, GSI Darmstadt, RHIC Brookhaven National Lab., Fermi Lab., uvam.) eine solche Theorie in systematischer Weise wie oben skizziert abzuleiten.

Nicht nur in den Wissenschaften, sondern auch in den praktischen Anwendungen des täglichen Lebens von der Privatperson über den Unternehmer bis zum Politiker werden Wissenssysteme vieles einfacher und besser lösen helfen. Wie schon im Abschnitt 3 erwähnt, wird man über das semantische Web auf Wissen gezielt und nach Bedarf zugreifen können, was die Fähigkeiten zum Problemlösen ungemein verbessern wird. Vor allem wird das Stückwerk bei der Bewältigung komplexer Aufgaben im öffentlichen Bereich überwunden werden können. In dem Buch *Lehren vom Leben* des Autors findet sich hierzu eine Reihe von Anwendungsbeispielen.<sup>20</sup> Nicht zuletzt ermöglichen Wissenssysteme, die Folgen des

---

<sup>16</sup> Alan Sokal, Jean Bricmont, *Eleganter Unsinn – Wie die Denker der Postmoderne die Wissenschaften missbrauchen*, C.H. Beck, München, 1999.

<sup>17</sup> Siehe [www.protest-research.eu/](http://www.protest-research.eu/).

<sup>18</sup> F. Bacon, *Meditationes Sacrae* 11, *Of Heresies*. In: *Essays. Religious Meditations. Places of Perswasion and Disswasion. Seene and Allowed (The Colours of Good and Evil)*. John Windet, London, 1597.

<sup>19</sup> Wolfgang Bibel, *AI and the Conquest of Complexity in Law*, *AI and Law Journal*, 12, 159–180, 2004.

<sup>20</sup> Wolfgang Bibel, *Lehren vom Leben – Essays über Mensch und Gesellschaft*, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 339 S., 2003.

Handelns besser vorzuberechnen und so im lokalen Handeln des Einzelnen oder der einzelnen Organisation wieder stärker eine globale Verantwortung einzubauen.<sup>21</sup>

## 6. Echte und vermeintliche Hürden

Im letzten Abschnitt wurde zugunsten eines attraktiven Ansatzes zur Komplexitätsbewältigung mithilfe von Wissenssystemen argumentiert. Warum ist er nach fünfzig Jahren KI-Forschung nicht längst realisiert?

Von Seiten der Informatik wird dazu sofort auf die der Inferenz innewohnende Komplexität verwiesen. In der Tat gibt es zu gegebenen formalen Systemen eine Reihe von zentralen algorithmischen Problemen ohne eine bislang bekannte polynomielle Lösung. Intellektiker halten hier dagegen, dass erstens Wissenssysteme in den praktischen Anwendungen gleichwohl sehr leistungsfähig sind und zweitens ja auch der Mensch dieser grundsätzlichen Komplexität unterworfen ist und trotzdem erstaunliche Leistungen erbringt.

Von Seiten der Philosophie wurde dagegen immer wieder der Versuch gemacht, die grundsätzlichen Grenzen derartiger Ansätze aufzuzeigen. Alle Versuche dieser Art sind bisher kläglich gescheitert. Vor allem der berühmte Gödelsatz wurde hier immer wieder bemüht, der aber im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit von Wissenssystemen nichts hergibt.<sup>22</sup>

Die wahren Gründe für den bislang immer noch verhaltenen Erfolg der Wissenssysteme liegen nach Überzeugung des Autors in der damit verbundenen intellektuellen Herausforderung einerseits und den in gesellschaftlichen Traditionen begründeten Widerständen andererseits. Vor allem im zweiten Abschnitt haben wir versucht aufzuzeigen, wie schwierig die Thematik von Logik und Inferenz ist. Sie erfordert, wie alle formalen Strukturwissenschaften (Mathematik, Informatik, Intellektik, etc.), ein Maß an Abstraktionsvermögen, das nur relativ wenigen Menschen zur Verfügung steht und zudem einer Förderung von Kindheit an bedarf. Darüber hinaus benötigen diese wenigen Menschen für ihre Arbeit ein vergleichsweise größeres Maß an andauernder Konzentration, das nur in einem dazu geeigneten Umfeld erbracht werden kann, wie es nur noch selten irgendwo – jedenfalls nicht mehr an Universitäten – anzutreffen ist. Schließlich belohnt die Gesellschaft vor allem sichtbare Anwendungserfolge, jedoch nicht die oft weit größeren intellektuellen Leistungen, die etwa in einem Wissensrepräsentationsformalismus oder einem Inferenzalgorithmus stecken. Im Gefolge all dieser Gegebenheiten hält sich der Umfang der Anstrengungen auf dem Gebiet der Wissenssysteme in vergleichsweise sehr engen Grenzen.<sup>23</sup> Auf einer solchen Sparflamme wird man die noch zu knackenden wissenschaftlichen Probleme jedenfalls nicht in kurzer Zeit lösen können.

Eine genauere Beschreibung der unseren Traditionen innewohnenden Widerstände gegen Wissenssysteme würde einen weiteren Aufsatz erfordern. In der Verarbeitung von Wissen ist dem Menschen bis heute eine ihn gegenüber der Tierwelt auszeichnende Fähigkeit geblieben, die er nicht gerne an Maschinen abtreten und dadurch eine weitere Demütigung erleiden möchte. Dies gilt vor allem dann, wenn mit dieser Fähigkeit lukrative Privilegien wie etwa im Rechtswesen oder in der Medizin verbunden sind. Aber auch das schlichte Eingeständnis der

---

<sup>21</sup> René von Schomberg, From the Ethics of Technology towards an Ethics of Knowledge Policy & Knowledge Assessment, A working document from the European Commission Services, EUR 22429, January 2007.

<sup>22</sup> W. Bibel, Mosaiksteine einer Wissenschaft vom Geiste. Eingeladener Vortrag auf der Konferenz über KI und Gödel, Arnoldsheim, 4.–6.4.2003, verfügbar unter [www.Intellektik.de](http://www.Intellektik.de).

<sup>23</sup> Vgl. das Vortragsmanuskript zu: W. Bibel, Benefit, Promise and Challenge of Artificial Intelligence, Eingeladenes Position Statement auf dem Roundtable The Way Ahead – Visions for Science, Society and Technology, Microsoft Research, Brüssel, 9.11.2006.

wissenschaftlichen Zunft, dass sie in besonders komplexen Fragestellungen grundsätzlich überfordert sei, ist schwerlich zu erwarten, könnte es doch dem gesellschaftlichen Ansehen dieser Zunft schaden. Diese Art von Widerständen bildet die tiefere Ursache dafür, dass auch von Seiten der Gesellschaft der nötige Erfolgsdruck bis heute kaum vorhanden ist.

Aus diesen beiden Gründen wird es mit der Bewältigung komplexer Systeme nach meiner Einschätzung in absehbarer Zeit weiter nur schleppend vorangehen, es sei denn Entwicklungen etwa im Klimabereich erzwingen die Fokussierung unserer Anstrengungen viel stärker als bisher auf die zentralen Kernbereiche, zu denen die Wissenssysteme in jedem Fall gehören.

**Dank.** Herrn Theodor Leiber bin ich für seine wertvollen Hinweise und Korrekturvorschläge zu großem Dank verpflichtet.