

Max Urchs

Maschine, Körper, Geist

Eine Einführung
in die Kognitionswissenschaft

Vittorio Klostermann · Frankfurt am Main

Meinen Eltern, Eva und Peter Urchs

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

© Vittorio Klostermann GmbH Frankfurt am Main 2002
Alle Rechte vorbehalten, insbesondere die des Nachdrucks und der Übersetzung.
Ohne Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, dieses Werk oder Teile in einem
photomechanischen oder sonstigen Reproduktionsverfahren oder unter Verwendung
elektronischer Systeme zu verarbeiten, zu vervielfältigen und zu verbreiten.

Umschlaggestaltung: Michel Leiner

Druck und Bindung: Hubert & Co., Göttingen

Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier  ISO 9706

Printed in Germany
ISBN 3-465-03196-2

VORGESCHICHTE

Es ist in der wissenschaftlichen Arbeit notwendig, für die Grundbegriffe der jeweiligen Disziplin präzise Explikationen anzugeben. Das ist, zumindest provisorisch, im ersten Kapitel geschehen. Hinreichend für erfolgreiche wissenschaftliche Forschung sind präzise angegebene Grundbegriffe allerdings bei weitem nicht. Für effektive wissenschaftliche Untersuchungen kommt es auch darauf an, daß Raum für Phantasie und schöpferische Gedankengänge bleibt. Dazu müssen die am Anfang der wissenschaftlichen Überlegungen stehenden Grundbegriffe einen Ansatzpunkt für die schöpferische Intuition bieten. Phantasieanregende Anschaulichkeit ist besonders in solchen Fällen wichtig, wo nicht ohne weiteres ein gemeinsamer Wissens- und Motivationshintergrund der am wissenschaftlichen Disput Beteiligten vorausgesetzt werden kann. Das gilt in besonderem Maße für kognitionswissenschaftliche Untersuchungen, die klar die Grenzen aller herkömmlichen Disziplinen überschreiten. Es verwundert also nicht, daß sich gerade in der Kognitionswissenschaft die ursprünglichen Denkmodelle durch besondere Anschaulichkeit auszeichnen.

Solche Denkmodelle, die weiterführenden Gedankengängen zugrunde liegen, werden auch *Metaphern* genannt. Vor allem zwei von ihnen spielen in der Kognitionswissenschaft eine bedeutende Rolle: Kognitive Systeme werden einmal in Form der sogenannten Computermetapher konkretisiert, zum anderen in Form der Gehirnmetapher. Letztere ist naheliegend genug, als daß man sich über ihre Herkunft lange Gedanken machen müßte: das menschliche Gehirn ist der eigentliche Ausgangspunkt aller kognitionswissenschaftlichen Reflexionen und bei der Definition des kognitiven Systems spielte offensichtlich auch die Vorstellung des menschlichen Kognitionsapparates stets eine hervorgehobene Rolle.

Auch die andere Metapher, die kognitive Systeme nach der Art eines Computers verstehen will, überrascht eigentlich wenig. Es war seit jeher so, daß der menschliche Verstand in Analogie zu jeweils aktuellen Entwicklungen der Wissenschaft, des Handwerks oder der Industrie erklärt worden war. So scheint es nur natürlich, daß wie-

derum das modernste Produkt technischen Fortschritts als Modell kognitiver Systeme ins Spiel gebracht wird. Die Computer-Metapher hat eine lange Vorgeschichte.

2.1 Frühe Automaten

In Mythen und Sagen waren künstliche menschenähnliche Wesen jederzeit präsent. Hephaistos, der Schmiedegott, hatte goldene Dienerinnen, die, wie Homer in der *Illias* vermerkt, über großes handwerkliches Geschick verfügten.¹ Hephaistos schuf ferner einen kupfernen Androiden Talos, der für König Minos dessen Insel Kreta bewachte. Talos wurde leider durch die Argonauten zerstört. Hephaistos fertigte auch, diesmal aus Ton, die Pandora. Sie sollte als erste „Frau“ auf Erden das von Prometheus gestohlene Feuer zurückholen. Der göttliche Konstrukteur hatte natürlich keine Schwierigkeiten, die Mechanismen mit Lebenskraft auszustatten.

Die ersten von Menschenhand geschaffenen Androiden waren bereits vor 4 1/2 Jahrtausenden in den Tempeln der alten Ägypter in Gebrauch. Die Menschenähnlichkeit dieser Objekte, die als Orakel für Eindruck sorgen sollten, war sozusagen naturgemäß: alle intellektuellen Aufgaben dieser Androiden wurden von einem in ihrem Innern versteckten Menschen übernommen. Später entstanden bald weniger eindrucksvolle, aber dafür ansatzweise autonome Mechanismen. Archytas von Tarent baute eine hölzerne Taube, die sich durch komprimierte Luft in einfache Bewegung versetzen ließ. Die unsichtbare, feine Substanz der Luft verlieh dem hölzernen Körper der Taube eine Art Lebendigkeit. Plato und Aristoteles mag diese Konstruktion ihres Zeitgenossen angeregt haben, über die Rolle der Seele oder der *vis vitalis* beim Antrieb des menschlichen Körpers nachzudenken. In seiner *Polites* träumt er von einer Welt, in der Automaten für die Menschen arbeiten. Dafür mag er ästhetische Gründe gehabt haben, einen wirtschaftlichen Bedarf an künstlichen Dienern gab es in der Sklavenhalterdemokratie wohl kaum. Realistisch waren diese Vorstellungen ohnehin nicht. Aber schon 200 Jahre später ist die Kunstfer-

¹Solche edel glänzenden schönen Frauenkörper haben die Phantasie der Automatenbauer seither gefesselt. Charles Babbage berichtet von silberglänzenden Tänzerinnen, die sich grazil und stumm bewegten und ihn als Jugendlichen so faszinierten, daß er sich sein Leben lang der Idee denkender Automaten zuwandte. Die Maschinendame aus Fritz Langs *Metropolis* repräsentiert eine lange Folge immer vollkommenerer „Jungesellenmaschinen“.

tigkeit der Handwerker in China so weit gediehen, daß sie angeblich ein ganzes mechanisches Orchester bauen konnten. (Frühen Überlieferungen aus dem Reich der Mitte begegnet man jedoch besser mit gesunder Zurückhaltung. Dichtung und Wahrheit ist oft nur schwer voneinander zu trennen.) Sicher scheint aber zu sein, daß um 700 in China erste wassergetriebene mechanische Uhren entwickelt wurden. In Europa ist man 600 Jahre später auch so weit. So entstanden allmählich die Baugruppen zum Antrieb künftiger Automaten.

Das europäische Mittelalter kennt den Automatengedanken ebenfalls, allerdings fällt seine Umsetzung hier wieder in den mystischen Bereich zurück. Paracelsus hatte eine ziemlich widerliche Methode, einen Homunculus herzustellen, der sogar weitergezüchtet werden konnte. Mit dem Golem entsteht der Typ eines Androiden, der besonders deutlich mit allen Hoffnungen und allen Ängsten der Menschen beladen ist, mit denen die Produkte der Robotik seit jeher assoziiert werden.² Albertus Magnus baute angeblich 30 Jahre lang an einer Dienerin aus Holz, Leder und Metall, die die Pflichten einer Empfangsdame innehatte. Nach Alberts Tod beleidigte sie dessen Schüler Thomas von Aquin so heftig, daß der sie als Teufelswerk erkannte und unverzüglich verbrennen ließ. (Andere Quellen stellen die Sache weniger spektakulär so dar, daß sich Thomas über den ihn an der Tür empfangenden Automaten derart entsetzte, daß er ihn mit einem Stecken zerschlug.) Der Kanonisierung der beiden Kirchenväter tat dieser Vorfall keinen Abbruch. Interessanter und glaubwürdiger sind Berichte über Arbeiten von Raimundus Lullus, die aus heutiger Sicht Beiträge zur *hardware-* und zur *software-*Entwicklung darstellen. Lullus ging in seinem Bemühen, die Ungläubigen zum Christentum zu bringen, von angeblich naturgegebenen kognitiven Defekten der Moslems aus, die ihnen die richtigen Einsichten erschwerten. Dem gedachte er durch didaktische Maschinen entgegenzuwirken, welchen ihnen die Herrlichkeit des christlichen Gottes durch Präsentation von Kombinationen seiner zahlreichen Vorzüge recht eindeutig vor Au-

²Die Legende vom Golem geht auf den *Talmud* zurück (Psalm 139, Vers 16). Das Wort bezeichnet zunächst einen Erdklumpen. Der Begriffsumfang erweitert sich, umfaßt alles Ungestaltete, Unfertige: einen Topf, der noch zu brennen ist; eine Frau, die noch nicht empfangen hat; einen ungebildeten Menschen. Als Bezeichnung für den künstlich geschaffenen Menschen taucht „Golem“ im 12. Jahrhundert in den Schriften der deutschen Kabbalisten auf (vor allem in den Kommentaren des Buches *Jezirah*.) Eine Bauanleitung findet sich bei Elzar aus Worms, gedruckt wurde sie erstmals durch Naftali ben Jakob Bacharach 1648 zu Frankfurt und wurde in die *Kabbala Denudata*, Sulzbach 1684 aufgenommen.

gen führen sollten. Praktisch funktionierte das dann so, daß konzentrische Kreisscheiben in Segmente eingeteilt waren, die die Eigenschaften Gottes bezeichneten. Wurden diese Scheiben gegeneinander verdreht, so ergaben sich immer neue Kombinationen göttlicher Erhabenheit, die an den übereinander stehenden Segmenten abzulesen waren. Gott war also *ewig* und *gut*, nach der nächsten Drehung *gut* und *allmächtig*, beim nächsten Mal kamen die Scheiben vielleicht bei *groß* und *allwissend* zum Stillstand. Solche belehrenden Vorträge konnten offenbar leicht mehrere Stunden lang dauern. Lullus wurde schließlich gesteinigt. Interessant ist der in seinen Apparaten implizit enthaltene Gedanke, daß vernünftiges Denken als mechanischer Prozeß ablaufen kann. Und zwar nicht nach Art des Syllogismus, sondern kombinatorisch. Rationales Denken erscheint hier zum ersten Mal als Analyse und Synthese von Repräsentationen.

Die Renaissance bringt auch bei der Konstruktion mechanischer Automaten einen Durchbruch. Die beim Uhrenbau entwickelten Techniken werden zur Herstellung immer raffinierterer Mechanismen genutzt. Berühmt wurde die 1540 von Gianello Toriano geschaffene Mandolinenspielerin. Diese Geräte hatten neben ihrem eigentlichen Zweck, zu unterhalten, deutlichen Einfluß auf das öffentliche Bewußtsein und damit auf die weitere Entwicklung von Konstruktionen, die zu den heutigen Robotern hinführten.

2.2 Harvey, Descartes und La Mettrie

Bis es soweit war, mußte aber auch auf philosophischem Gebiet noch manches bewegt werden. Wir wollen uns im Folgenden auf diesen Aspekt konzentrieren. Ein Anfang kann hier vielleicht bei den Vorstellungen William Harveys gesetzt werden, dem Entdecker des Blutkreislaufes, der sich den Menschen als ein System von durch Röhren mit strömenden und pulsierenden Flüssigkeiten verbundenen Gefäßen vorstellte. In seinem Werk *Über die Bewegung des Herzens und des Bluts bei Tieren* wird der Blutkreislauf wie eine technische Konstruktion aus einer Pumpe und einer Reihe von Röhren und Ventilen dargestellt. Rene Descartes nahm Harveys Gedanken – gemessen an seinen eigenen sehr hohen Standards wissenschaftlicher Originalität und an dem Umstand, daß es sich bei Harvey um einen Engländer handelte – geradezu enthusiastisch auf: Im fünften Teil seines *Discours de la méthode*, in dem er detailliert untersucht, inwiefern die Metapher

der Maschine auf Organismen anwendbar sei, lobt er Harvey (den er freilich nur als „einen englischen Arzt“ zitiert) dafür, daß er das Eis auf diesem Gebiet gebrochen hat. Die Maschinenmetapher bestimmte die Richtung eines umfassenden biologischen Forschungsprogrammes: Man solle sich mit solchen Eigenschaften der Organismen befassen, die diese mit Automaten gemeinsam haben, also mit Maschinen, die aus beweglichen Einzelteilen zusammengesetzt sind und speziell bestimmbare Funktionen ausführen. Dieses Programm, das die zuvor übliche holistische Auffassung des Körpers ablöste, erwies sich als für die Biologie ungemein erfolgreich. Richard C. Lewontin bemerkt dazu:

So besteht die selbstgestellte Aufgabe aller mechanistischen Biologie darin, die verschiedenen Schraubchen und Rädchen der Maschine zu beschreiben, darzustellen, wie die Teile ineinandergefügt sind und wie sie sich bewegen, damit die Maschine als Ganzes funktioniert, und schließlich darüber Auskunft geben, für welche Zwecke die Maschine konstruiert wurde. ([102], 113)

Descartes' einzige Einschränkung seiner mechanistischen Auffassungen bestand darin, der Seele einen Ort zu reservieren. Einen nicht eben komfortablen freilich: die Zirbeldrüse. Auch die Frage, wie die Seele von der Zirbeldrüse aus den Körper steuern sollte, war nicht recht klar. Descartes stellte sich die Sache etwa so vor: die Seele wirkt auf eine besonders feine Art von Materie ein, die sich in der Zirbeldrüse befindet. Diese besonders feine Materie wird durch Regungen der Seele angeregt, in Schwingungen versetzt. Körpersäfte, welche die Zirbeldrüse umfließen, nehmen diese Schwingungen auf und transportieren sie in andere Körperbereiche, wo sie verstärkt werden und Organe, Drüsen und Muskeln in Bewegung setzen. Muskeln bewegen u.a. die Extremitäten, die ihre Bewegungen sogar gegen äußere Widerstände vollziehen können und so auch Objekte außerhalb des Körpers mitbewegen können. Auf diese Weise wirkt die Seele durch den Körper auch über den Körper hinaus in die Welt. Die Seele gibt also nur den Hauch des ersten Anstoßes, von dem aus sich immer robustere physikalische Kräfte entfalten. Das Bild scheint allemal plausibler, als die Vorstellung einer Seele, die sich damit abplackt, z.B. den zentnerschweren Körper eines französischen Edelmannes auf sein Pferd zu heiven.

Leider scheint es nur so. Aus philosophischer Sicht macht es gar keinen Unterschied, ob die Seele Zentnerlasten bewegt, oder nur feinste Materie anregt. Das Problem liegt allein in der Beeinflussung von

Physikalischem durch Nicht-Physikalisches. Wie schaffen es die „Kausalkräfte der Seele“, den ontologischen Abgrund zwischen beiden Bereichen zu überwinden? Descartes Idee von der feinsten Substanz, die die Seele anzuregen hat, um alle weiteren Wirkungsketten in Gang zu setzen, löst das Problem nicht, sie verschiebt es nur. Man denkt an das Häkchen, von dem Gottlob Frege in einer seiner Vorlesungen berichtete: „Ein Mann hatte nach jahrelanger Arbeit ein *perpetuum mobile* fast fertiggestellt. Was ihm einzig noch fehlte, war ein Häkchen, das immer so macht!“ (Und hier vollführte Frege eine greifende Bewegung mit dem Zeigefinger.) Bis man diese Häkchen hat, kann die Descartesche Seele allenfalls Repräsentationsaufgaben übernehmen – jeder kausale Einfluß auf den Körper bleibt rätselhaft.

Aber selbst dieser bescheidene kartesianische Pakt wurde schon einhundert Jahre später durch Julien Offray de La Mettrie gebrochen. In seinem Buch *L'homme machine* erklärt er 1747 den Menschen zu einer reinen Maschine. Er führt in diesem Buch manche Beispiele an, einige aus der persönlichen Erfahrung seiner Tätigkeit als Militärarzt, wie menschliche und tierische Körper auch über ihren Tod hinaus, also im unbeseelten Zustand, noch auf äußere Anregungen reagieren. Die mechanische Funktion des menschlichen Körpers, so der naheliegende Schluß, bedarf für ihre Abläufe der Seele also nicht. La Mettrie spricht vom Menschen als der „erleuchteten Maschine“. Erleuchtet vom Licht der Vernunft, die in der komplexen Umgebung des Menschen, mit all ihren natürlichen, aber auch kulturellen und sozialen Momenten, aufscheint. Bei einer solchen Deutung bleibt die These vom Menschen als der „aufrecht kriechenden“ und dabei erleuchteten Maschine auch hinsichtlich der Ergebnisse moderner Neurowissenschaft plausibel. Allerdings dauerte es noch ein paar Jahrhunderte, ehe man allgemein zu einer gelassenen Einstellung gegenüber dieser Position fand. La Mettries Zeitgenossen erschien sie mehrheitlich als unerhörte Provokation. Die Maschinen, mit denen man seinerzeit im Alltag Umgang hatte, waren einfach nicht danach, sie auch nur im Mindesten für menschenähnlich zu halten. Wer konnte dann schon ruhig bleiben bei der Behauptung, er selbst oder seine Mitmenschen seien so eine Art Wassermühle oder Kirchturmuhre.

La Mettries nachgeschobene Erläuterungen vom menschlichen Organismus als einem System sich gegenseitig aufziehender Spiralfedern waren auch nicht angetan, die Wogen der öffentlichen Empörung zu glätten. „Das Gehirn hat Muskeln zum Denken, wie das Bein Muskeln zum Gehen hat“ behauptete er mit beachtlichem Mangel an Sensibi-

lität.³ Bei der traditionell freigeistigen französischen Elite regte sich ungewohnt scharfer Widerspruch. Die Gefahren für das Gemeinwesen durch um sich greifende Verwilderung der Sitten in einer erst einmal als gottlos erkannten Welt erschienen unkalkulierbar groß.

La Mettries menschliche Maschine war offenbar durch die seinerzeit phantastisch anmutenden Entwicklungen mechanischer Uhren und Automaten – wie die des Schweizer Mechanikers und Spielzeugmachers Jacques de Vaucanson – inspiriert worden. Vaucanson war 1740 zum Direktor der Lyoner Seidenfabriken berufen worden und entwickelte die automatische Steuerung für Seidenwebstühle, mehr als ein halbes Jahrhundert vor Jacquart, dem diese Erfindung oft zugeschrieben wird. Für La Mettrie waren aber gewiß die von Vaucanson gebauten mechanischen Puppen wichtiger, der Flötenspieler von 1738, der Musiker (1739) und vor allem die im gleichen Jahr gebaute Ente. Diese sorgte in den Pariser Salons für Furore, wie sie schnatternd und Körner pickend über das Parkett watschelte und feuchte Häufchen „Unrats“ zurückließ.

Man war in dieser Zeit mit Feuereifer dabei, Objekte, die sich von selbst bewegten, in die Welt zu setzen – fest entschlossen, den naturgegebenen Vorteil der Frauen, neues Leben zu spenden, durch besondere Perfektion der eigenen Produkte wieder wett zu machen. Zu den berühmtesten Automatenbauer gehörten, neben den schon erwähnten Toriano und Vaucanson, ein Mann namens Maillardet, der künstliche Schwäne und Pferde baute, Friedrich von Knaus, Vater und Sohn Fendler. Zu erwähnen sind mehrere Vertreter der Familie Jaquet-Droz und ihr Mechaniker Jean-Frederic Leschot, die ihre Zeitgenossen vor allem mit dem *Kleinen Schreiber* zu beeindrucken vermochten. Dieser konnte ganze Textpassagen zu Papier bringen und dabei dem Kratzen der Feder mit den Augen folgen. Der Freiherr von Kempelen erregte mit seinem schachspielenden Automaten Aufsehen. Jean Paul befürchtete, Kempelen könnte seinen Automa-

³Man fühlt sich an die Geschichte vom braven russischen Techniker Kotschemassow erinnert, der die Bauern seines sibirischen Heimatdorfes für die neuen Flugmaschinen begeistern (und zu Spenden für einen neuen Aeroplan anregen) wollte. Er berichtet ihnen, die noch nie etwas von Flugzeugen gehört oder gesehen hatten, begeistert und anschaulich von der Kraft der Maschinen, deren Propeller ohne weiteres eine Kuh in Stücke schlagen könne. Die ängstliche Nachfrage der Bauern, ob mit diesem Teufelszeug auch Pferde erschlagen würden, bestätigte er voller Stolz. Geld für ein neues Flugzeug bekam er nicht. Kotschemassow stellte fest, daß die ungebildeten Bauern für die moderne Technik offenbar noch nicht reif waren ...

ten mit Triebwerken ausstatten, mittels derer er entsetzlich fluchen und betrügen könne. Damit kam er der Wahrheit näher, als er ahnte, denn in Kempelens Konstruktion verbarg sich ein menschlicher Schachpieler, der den Mechanismus bediente. Kempelen steht damit in einer Tradition unlauterer Wettbewerber, die nichtsdestotrotz den Glauben an die Leistungsfähigkeit der künstlichen Menschen enorm beflügelten. Allein der Umstand, daß er die Öffentlichkeit täuschen konnte, sagt viel über die Stimmung zu jener Zeit. Joseph Farber baute in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts seine Sprechmaschine EUPHONIA. Diese trieb ihren Schöpfer bald zur Verzweiflung und in den Selbstmord und kann als Urform mechanischer Frauenfiguren gesehen werden.

Manche der auch aus heutiger Sicht noch beeindruckenden Konstruktionen sind im Museum im Schweizer Neuenburg mitunter noch in Funktion zu bewundern. Man ahnt, welch ungeheuren Eindruck diese Automaten auf ihre Zeitgenossen gemacht haben müssen. Es erscheint dann plausibel, daß man sich auf dem richtigen Weg wähnte: gerade so mußte das Ziel eines dem Menschen immer ähnlicheren und ihn letztlich übertrumpfenden künstlichen Wesens zu erreichen sein.

2.3 Gottfried Wilhelm Leibniz

In einer Tradition, die letztlich zur Vorstellung des menschlichen Gehirns als Computer führt, muß die Entwicklung der ersten mechanischen Rechenmaschine durch Gottfried Wilhelm Leibniz besonders hervorgehoben werden. Vorstellungen des Gehirns als System von durch Röhren mit strömenden und pulsierenden Flüssigkeiten verbundenen Gefäßen mögen ihren Ursprung in den Erlebnissen chemischer Apparaturen gehabt haben. Dieses Bild stand Harvey und Descartes vor Augen. La Mettrie wurde durch Uhren mit ihren Spiralfedern und Rädchen angeregt. Auch Leibniz schien eher in den surrealen Zahnradchen komplizierter Uhrwerke Inspiration gefunden zu haben und stellte sich vor, in den maßstäblich vergrößerten Räderwerken künstlicher Gehirne wie in einer Mühle spazierenzugehen.⁴

⁴So schreibt er in Abschnitt 17 seiner *Monadologie*:

Denkt man sich etwa eine Maschine, die so beschaffen wäre, daß sie denken, empfinden und perzipieren könnte, so kann man sie sich derart proportional vergrößert denken, daß man in sie wie in eine Mühle eintreten könnte. Dies vorausgesetzt,

Charles Sherington und Carl Ludwig Schleich sahen eine Analogie zwischen menschlichem Gehirn und den seinerzeit beeindruckenden riesigen Schalttafeln der Telefonzentralen. All diese vom technischen Fortschritt angeregten Metaphern erzeugten ein Klima, welches seinerseits dem technischen Fortschritt förderlich war. Sigmund Freuds bekanntes Gleichnis von der menschlichen Psyche als einer Dampfmaschine fällt ebenfalls in die Tradition, Menschenbilder mit technischen Entwicklungen zu assoziieren. Allerdings kam es hier, ähnlich wie bei der Pumpenmetapher, nicht zur umgekehrten Beeinflussung: für dem Bau von Wärmekraftanlagen blieb die Psychoanalyse ähnlich unergiebig, wie Harvey's Bild seinerzeit für die Entwicklung der Labor-technik folgenlos war. Ein später Nachhall mechanistischer Ansätze findet sich in behavioristischen Theorien der Psychologie, Biologie oder auch der Philosophie des Geistes. Hier versucht man, alle mentalen Phänomene als Resultate extern beobachtbarer Reaktionen auf äußere Reize zu fassen, zur Korrelation wird beispielsweise eine Art prästablierter Harmonie angenommen. Wir werden im II. Teil darauf noch zurückkommen.

Bleiben wir jedoch zunächst beim Beitrag von G. W. Leibniz. Seine höchst anregenden philosophischen, sprachwissenschaftlichen und mathematischen Reflexionen konzentrierten sich unter anderem auch auf die Mechanisierbarkeit menschlichen Denkens. Sein Ideal einer *characteristica universalis* sollte auch dem Streit der Philosophen ein für allemal ein Ende setzen. Den Mathematikern gleich hätten sie im Besitz einer solchen universellen Sprache all ihre sich vordem unendlich dehnenden Dispute zweifelsfrei lösen können. Statt zu streiten sollte die Losung lauten: „Calculemus! Laßt uns zu Bleistift und Papier greifen und nachrechnen, wer Recht hat!“ Alle Begriffe sollten dazu in numerische Darstellung gebracht werden, komplexe Begriffe ließen sich aus den ihnen zugrunde liegenden Elementarbegriffen errechnen und inhaltliche Beziehungen zwischen Begriffen ergäben sich aus arithmetischen Zusammenhängen zwischen den sie repräsentierenden Größen.

„Wenn wir beispielsweise den Begriff ‚Lebewesen‘ durch die Zahl 2 (oder allgemeiner – durch a) ausdrücken würden, den Begriff ‚vernunftbegabt‘ dagegen mittels der 3 (oder allgemeiner – r), dann wäre der Begriff ‚Mensch‘

wird man bei der Besichtigung ihres Inneren nichts weiter als einzelne Teile finden, die einander stoßen, niemals aber etwas, woraus eine Perzeption zu erklären wäre.

durch die Zahl 2×3 , d.h. 6 [...] (oder allgemeiner – durch das Produkt ar) ausgedrückt.“ ([95], 42)

Leibniz war bei der Einschätzung der Bedeutung seiner Erfindung nicht zurückhaltend. Wenn sein *calculus ratiocinator* denn erst vollständig ausgearbeitet vorläge, so würde es den Erkenntnishorizont des Menschen um ein Vielfaches dessen vergrößern, was zur Erweiterung des menschlichen Gesichtsfeldes das Fernrohr und das Mikroskop beigetragen hätten. Und zwar um so vieles, wie der Verstand dem Augenschein überlegen sei. Mit diesem neuen Erkenntnismittel ließen sich Enzyklopädien allen wahren Wissens dann sozusagen am Schreibtisch erstellen. Und ganz nebenbei würde man auch Platons Problem lösen: die Intuitionen und die durch Erfahrung erworbenen Fertigkeiten der Handwerker und Künstler ließen sich in die Analyse einbeziehen – auch ihnen liegt ja auf einer tieferen Ebene eine klar anzugebende theoretische Struktur zugrunde.

Leibniz' Zeitgenossen mag ein solcher Vorschlag merkwürdig erschienen sein, wenngleich er selbst glaubte, eine geeignete Sprache mit einer Anzahl ausgewählter Männer binnen weniger Jahre ausarbeiten zu können. Die Menschheit hätte so – meinte Leibniz – ein Mittel zur Hand, welches die Leistungsfähigkeit des Verstandes mehr verstärken würde, als das optische Glas die Sehkraft verstärkt hatte. Angesichts der gelungenen Konstruktion einer mechanischen Rechenmaschine für die vier Grundrechenarten, eines Apparates also, der mit Zahlen mechanische Berechnungen anstellen sollte, konnte man hier den Umriss einer Gesamtkonzeption erkennen, der aus Sicht der heutigen KI erstaunlich anmutet: die von der Maschine durchgeführten Berechnungen lassen sich angesichts der inhaltlichen Deutbarkeit der in der Rechnung verwendeten Entitäten, als Objekte der neuen Sprache, bereits als eine Art Simulation von Verstandesoperationen interpretieren. Die Entwicklung dieses Arithmometers, die in erster Linie mühselige astronomische Berechnungen erleichtern sollte, war sicher auch durch den gedanklichen Hintergrund der *characteristica universalis* inspiriert und sie wirkte durch ihre bloße Existenz belebend auf solche Konzeptionen zurück. Auch hier beeinflussen sich also philosophische Spekulation und technischer Fortschritt gegenseitig.

Gegen Leibniz' Vision regte sich sogleich Widerspruch, mit mehr oder weniger gut begründeten Argumenten. Descartes hatte ja längst auf die prinzipiellen Unterschiede zwischen dem Menschen und allen anderen Formen der diskreten Materie hingewiesen. Seine in kunstvollem Nachweis erzielte Folgerung „*cogito ergo res cogitans*“ war,

zusammen mit dem sich ergebenden Dualismus, also der fundamentalen Unterscheidung zweier Substanzen, prägend für das gesamte sich anschließende Subjekt-Objekt-Problem und stellt bis heute den eigentlichen Ursprung der Diskussion in der Geistesphilosophie dar. Angesichts dieser ungemein einflußreichen dualistischen Konzeption stellt sich die Frage, wie die Leibniz'sche Idee eines maschinellen Verstandes überhaupt Fuß fassen konnte. Kurz: wie konnte man nach Descartes noch so etwas sagen?

Daß solche Vorstellungen einen Platz in der philosophischen Landschaft behaupteten und bemerkenswerte Verbreitung fanden, verdanken sie ihrer starken und zuverlässigen Ausstrahlung, vor allem in geistigen Krisenzeiten. Angesichts ins Schwanken geratener, sicher geglaubter Fundamente, angesichts von um sich greifender Orientierungslosigkeit und Verzagttheit, überhaupt jemals sicheres Wissen erlangen zu können, steigt natürlich die Attraktivität einer Konzeption, die das Jammerbild eines von Grund auf unzuverlässigen Verstandes durch die Vorstellung eines in höchstem Maße präzisen Mechanismus, der unfehlbar seine Folgerungen ableitet, ersetzt. Vielleicht wohnt der menschlichen Natur ein Streben nach Ausgleich inne, was in unseren Tagen postmodernistischer Beliebigkeit die Säle der Vorlesungen zur Künstlichen Intelligenz füllt und die Leserzahlen populärer Bücher zur modernen Physik in nie gekannte Höhen steigen läßt?

2.4 Die ersten Computer

In einer Geschichte der rechnenden Maschinen muß unbedingt der von Charles Babbage, Lucasian Professor für Mathematik an der Universität Cambridge, entwickelte *ANALYTIC ENGINE* von 1840 erwähnt werden. Babbage wurde dabei durch Lady Ada Augusta Lovelace wesentlich unterstützt. Trotz der aufgrund technologischer Beschränkungen nur mangelhaft ausgeführten Konstruktion verkörperte der *ANALYTIC ENGINE* einen geradezu revolutionären Fortschritt auf dem Wege zum heutigen Computer: es handelte sich um die erste frei programmierbare Rechenmaschine der Welt. Bald darauf entwickelte George Boole die nach ihm benannten algebraischen Kalküle, die sich später als von grundlegender Bedeutung für die Herausbildung der modernen Aussagenlogik und folglich für die Programmierung von Rechenmaschinen erwiesen.

Zu etwa jener Zeit erlebte das Thema „künstliche Intelligenz“ auch

in der Kunst eine Renaissance. Jean Paul, Achim von Arnim, Ernst Theodor Amadeus Hoffmann, Anette von Droste-Hülshoff, Heinrich Heine, Heinrich von Kleist und viele andere wenden sich dem Thema zu. Mit *Frankenstein* erschuf Mary Wollstonecraft Shelly im gleichnamigen Schlüsselroman der *Gothic Novel*, ganz entgegen ihrer eigentlichen künstlerischen Absicht, das Symbol des von Menschenhand erschaffenen Monsters schlechthin, welches seitdem im öffentlichen (Unter-)Bewußtsein die dunklen Seiten künstlichen Lebens repräsentiert. In der Folge beschäftigten Golems, eiserne Holzfäller und Roboter (erstmal in einem Schauspiel Karel Czapeks von 1920 [deutsche Übersetzung in [36]]) die Literatur, den frühen Film und also zunehmend die Vorstellungswelt der Menschen. In der mathematischen Forschung entstanden, wie oben erwähnt, entscheidende Vorarbeiten zu theoretischen Grundlagen der Rechentechnik. Physik und Technologieentwicklung taten ein übriges, so daß Mitte der dreißiger Jahre des vergangenen Jahrhunderts die Komponenten vorlagen, aus denen die ersten programmierbaren, elektronischen Computer entstanden.

Wie so oft in der Geschichte von Wissenschaft und Technik kam der entscheidende Durchbruch dann fast zur gleichen Zeit an verschiedenen Orten unabhängig voneinander zustande. In Deutschland sägte Konrad Zuse 1930 im elterlichen Wohnzimmer an seinem ersten Computer Z1, wobei er die Tücken des Materials zunächst nicht überwinden konnte. Dafür verwendete Zuse aber bereits im Z1 die digitale Zahlendarstellung. Dies vereinfachte die technischen Aspekte des Rechnens enorm und machte seine Maschine weniger störanfällig und somit den Apparaten Leibniz' (der diese theoretische Einsicht durchaus auch schon hatte) und Babbages überlegen. Mehr noch: Dank der Verwendung von Binärzahlen konnte er problemlos auch die Boolesche Algebra zur Verknüpfung der Rechenoperationen nutzen. Alle Vorarbeiten der modernen Logik waren nun für die Erstellung komplexer Programme nutzbar. Ein 1936 gestellter Patentantrag auf ein „Verfahren zur selbsttätigen Durchführung von Rechnungen, die sich aus elementaren Rechenoperationen in beliebiger Reihenfolge zusammensetzen, mit Hilfe von Rechenmaschinen, dadurch gekennzeichnet, daß einerseits im Verlauf der Rechnung auftretende Zahlen gespeichert werden und mittels eines Wählwerks jederzeit einer Rechenvorrichtung zur Verfügung stehen, andererseits die erforderlichen Operationen ausgelöst und gesteuert werden durch das Abtasten eines Rechenplanes, der für jede Operation die auszuführende Grundrechnungsart, die Nummern der die jeweils erforderlichen Zahlen ent-

haltenden Speicherzellen, und die Nummern der das Resultat speichernden Zelle fortlaufend und selbständig angibt“ ([210], 12) wurde 1967 wegen „mangelnder Erfindungshöhe“ endgültig abgelehnt. Vielleicht lag es auch am Titel?

Zwischen 1936 und 1941 baute Zuse dann die „richtige“ Rechenmaschine Z3, den ersten programmgesteuerten Elektrorechner. Der Z3 besaß 2600 Relais, verfügte über einen Speicher für 63 Ziffern und brachte es auf immerhin 15 bis 20 arithmetische Operationen pro Sekunde. Konrad Zuse erhielt während des III. Reiches für seine bahnbrechenden Entwicklungen so gut wie keine staatlichen Aufmerksamkeit oder Förderung – bei der Deutschen Versuchsanstalt für Raumfahrt galt er als Sonderling oder gar als Scharlatan. Behauptungen, seine Maschine sei beim V2-Projekt verwendet worden, dürften mit Sicherheit falsch sein. Das Nachfolgemodell des Z3, der Z4, gelangte gegen Kriegsende von Berlin über Göttingen ins Allgäu, wurde dort versteckt und kam 1949 schließlich an die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, wo er bis 1955 am Institut für Angewandte Mathematik genutzt wurde. In der materialarmen Nachkriegszeit verlegte sich Zuse im bayrischen Hinterstein auf die *software*-Entwicklung und erarbeitete für seine Maschinen eine spezielle algorithmische Programmiersprache, den sogenannten Plankalkül. Er war sich durchaus im Klaren darüber, was er da tat:

Ein primitiver Typ eines mechanischen Gehirns besteht aus einem Speicherwerk, Wählwerk und einer einfachen Vorrichtung, in der einfache Bedingungsketten von 2–3 Gliedern behandelt werden können. Mit dieser Form von Hirn muß es theoretisch möglich sein, sämtliche Denkaufgaben zu lösen, die von Mechanismen erfaßbar sind, jedoch ohne Rücksicht auf die dazu erforderliche Zeit. ([211], 41)

Zuses Ziel war die Entwicklung zellulärer Automaten, neuronaler Netze, wie sie inzwischen meist genannt werden. Er träumte von der „technischen Keimzelle“ der künstlichen Intelligenz, welche sich durch selbständiges Lernen vervollkommen und die menschliche Intelligenz eines Tages überflüssig machen würde. So weit die Gedanken dieses erstaunlichen Mannes auch in die Zukunft reichten, gegen die Umstände, unter denen er seine Forschungen in der entscheidenden Phase betreiben mußte, war er machtlos.

Mehr Aufmerksamkeit wurde Forschungen zur Entwicklung elektronischer Rechner in den USA zuteil. So spricht man heute oft vom Atanasoff-Berry-*computer* (kurz: *ABC*) als vom ersten Digitalrechner. Er wurde von John Vincent Atanasoff und Clifford Berry an der

Iowa State University in den Jahren 1937–42 gebaut und und nutzte erstmals Begriffe der binären Arithmetik, verfügte über einen regenerativen Speicher und Logik-Schaltkreise. Der US-Bundesrichter Earl R. Larson entschied am 19. Oktober 1973, nach langem Gerichtsprozeß, daß ein den Konstrukteuren der ENIAC-Maschine erteiltes Patent unberechtigt sei und sprach Atanasoff die Erfindung des elektronischen Digitalrechners zu.

Die ENIAC war im Jahre 1944 durch J. Presper Eckert und John v. Mauchly an der Penn State University gebaut worden. Sie verfügte über Elektronenröhren anstatt der üblichen Relais und arbeitete dadurch wesentlich schneller, war aber auch störanfälliger (statistisch gesehen fiel alle paar Minuten eine Röhre aus.) Im selben Jahr entstand an der Harvard University der MARK IV. Diese Arbeiten wurden auch aus Gründen ihrer potentiellen militärischen Nutzbarkeit gefördert. Ebenfalls wegen ihrer militärischen Relevanz wurden die Forschungen einer Gruppe englischer Wissenschaftler in Bletchley Park vorangetrieben. Das geheime Projekt, an dem auch Alan Turing beteiligt war, hatte, durch rechnergestützte Entschlüsselung der mittels der deutschen Kodierungsmaschine ENIGMA chiffrierten Funkprüche für die U-Boot-Flotte der Nazis, einen nachweisbaren Einfluß auf den Ausgang des II. Weltkrieges. Zu diesem Zwecke war COLOSSUS, einer der frühesten Elektronenrechner, eingesetzt worden.

Diese Rechenmaschinen waren, anders als Zuses Geräte, fest verdrahtet, so daß sie für jede veränderte Aufgabenstellung umgebaut werden mußten, indem man ihre Bauelemente auf neue Weise miteinander verschaltete. Sie waren also noch nicht im eigentlichen Sinne programmierbar. Der entscheidende Fortschritt in der Computerarchitektur setzte sich erst mit Arbeiten des ungarischstämmigen Mathematikers John von Neumann allgemein durch. In genauer Kenntnis der Turingschen Arbeiten schlug er vor, die Programme dem Computer in ähnlicher Form wie die Daten für anzustellende Berechnungen, nämlich als kodierte Datensätze, einzugeben und im Speicher unter einer festen Adresse abzulegen. Daten und Programme sind im Speicher verschieden kodiert und streng voneinander getrennt. Die Maschine hat in der Regel nur auf die Daten Zugriff. Die Berechnung erfolgt in einem zentralen Prozessor. Durch diese „von-Neumann-Architektur“ war bei einem Wechsel der Arbeitsaufgabe kein Eingriff in die Konstruktion des Rechners mehr nötig. Die Maschine konnte sich viel mehr jeweils in ihre neue Rolle „einlesen“.

Von Neumann begann ebenfalls im Team der Penn State Uni-

versity zu arbeiten und entwarf seine EDVAC (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*) genannte Maschine 1945 – mit Sicherheit nicht ohne die Unterstützung Eckerts und von Mauchly. In einem fast gleichzeitig geschriebenen Forschungsbericht äußerte Alan Turing ähnliche, aber noch weitergehende Gedanken, ohne sie aber später weiter zu verfolgen. 1951 entstand mit dem UNIVAC I (*Universal Automatic Computer*) bei Remington Rand einer der ersten kommerziell genutzten Rechner, der gemäß von-Neumanns Prinzipien funktionierte.

2.5 Herausbildung der mathematischen Logik

Vor 100 Jahren wurde ein großangelegter Versuch begonnen, der wieder und wieder aufklaffenden Risse im Gebäude der Mathematik Herr zu werden.⁵ Dieser Rettungsversuch, der nicht nur das konkrete Problem auflösen, sondern die Mathematik ein für alle mal vor solchen durch plötzlich entdeckte Widersprüche hervorgerufene Grundlagenkrisen bewahren sollte, wurde unter dem Namen „Hilbert-Programm“ berühmt. Bei diesem strategisch angelegten Unternehmen sollte mit finitistischen Methoden Zug um Zug die Widerspruchsfreiheit der einzelnen mathematischen Disziplinen – und somit schließlich der Gesamtwissenschaft – nachgewiesen werden. Man kann hier durchaus das Leibnizsche Leitmotiv einer *mathesis universalis* wiedererkennen. David Hilberts Plan war folgender: Die einzelnen Teildisziplinen werden als axiomatische Theorien aufgebaut, d.h. als in einer formalen Sprache klar definierte Zusammenstellung apriorischer Wahrheiten, zusammen mit einem Bestand an Schlußregeln, die aus den Axiomen Folgerungen zu ziehen gestatten. Diese Folgerungen bilden dann zusammen mit den Axiomen die Theoreme oder auch Sätze der jeweiligen Theorie.

Damit Hilberts Plan funktioniert, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Man muß sich darauf verlassen können, daß jede mathematische Aussage in einer geeigneten formalen Sprache formuliert werden kann. Hilbert hatte gute Gründe anzunehmen, daß die Spra-

⁵Der Anlaß war ein Paradoxon, welches durch Bertrand Russell in den Grundlagen der Mathematik entdeckt worden war. Die – durch die damals übliche Mengenauffassung nicht ausgeschlossene – Existenz einer Menge, die gerade alle Objekte enthält, welche nicht Element von sich selbst sind, führte zu einem Widerspruch ausgerechnet in derjenigen Disziplin der Mathematik, welche das Fundament der gesamten Wissenschaft darstellte.

che der Prädikatenlogik erster Stufe eine solche geeignete Sprache sei. Weiter war vorauszusetzen, daß alle dem Mathematiker in seiner Arbeit zur Verfügung stehenden Folgerungsverfahren in einem Logikkalkül, welcher der axiomatisierten mathematischen Theorie zugrunde liegt, nachgebildet werden können. Beide Annahmen sind keine mathematischen Thesen und können somit auch nicht streng bewiesen werden. Sie lassen sich aber durch den Verweis auf durch jahrhundertelange Erfahrungen der Mathematiker gefestigte Intuitionen plausibel machen.

Das Hilbert-Programm wurde in aussichtsreichem Stadium durch ein Ergebnis der mathematischen Grundlagenforschung erschüttert, welches nicht nur zu den bedeutendsten Resultaten der Mathematik in unserem Jahrhundert zählt, sondern auch aus Sicht des uns hier beschäftigenden Themas höchst erwähnenswert ist: Kurt Gödel zeigte 1931, daß jedes mathematische System, welches hinreichend umfassend ist, Sätze enthält, welche weder bewiesen, noch widerlegt werden können. „Hinreichend umfassend“ im Sinne dieses Resultats ist ein System schon dann, wenn es zumindest die Rechnungen im Bereich der natürlichen Zahlen zu vollziehen erlaubt. Das sind nun nicht gerade übertriebene Ansprüche an die Leistungsfähigkeit einer mathematischen Theorie. Systeme mit unbeweisbaren und gleichzeitig nichtwiderlegbaren Sätzen heißen *unentscheidbar*. Diese Bezeichnung erklärt sich daraus, daß es kein Verfahren gibt, welches für ein beliebig herausgegriffenes Element der formalen Sprache des Systems zu entscheiden gestattet, ob es sich um einen wahren Satz handelt (oder – was hier auf dasselbe hinauslaufen würde – um einen falschen). Dieses Ergebnis harmoniert nicht mit dem Geist des Hilbert-Programmes.

Die spezifischen Schwierigkeiten beim Beweis des Gödelschen Satzes entstehen u. a. daraus, daß es sich um ein negatives Ergebnis handelt: es gibt kein solches Verfahren. Zum Nachweis der Entscheidbarkeit eines Systems genügt es, ein entsprechendes Verfahren anzugeben. Das vorgelegte Verfahren wird durch die mathematische Gemeinschaft geprüft und für geeignet befunden, oder aber als mangelhaft zurückgewiesen, womit die Suche von neuem beginnen muß. Entscheidend ist, daß ein intuitiver, nur „mehr oder weniger präziser“ Begriff des Entscheidungsverfahrens, über den Einmütigkeit herrscht, ausreicht, um konkrete Verfahren als entscheidbar zu erkennen. Zumindest war das in allen bis dato relevanten Fällen so gewesen. Man legt zur Lösung eines konkreten Problems ein konkretes Verfahren vor, welches von den Fachleuten als korrekt akzeptiert wird.

Grundsätzlich anders verhält es sich bei negativen Behauptungen, wie beispielsweise bei der These des Gödelschen Satzes. Um die prinzipielle Nichtexistenz eines bestimmten Typs von Verfahren streng nachzuweisen, muß eine völlig klare Begriffsbestimmung vorliegen. Um hierfür eine Illustration zu geben: Die Behauptung „Es gibt auf der Welt noch gute Menschen“ kann etwa durch Verweis auf Zeitgenossen wie Albert Schweizer begründet werden. Die entsprechende negative Behauptung „Es gibt gar keine guten Menschen mehr“ zieht bei aufmerksamen Zuhörern dagegen unweigerlich die Frage nach sich: „Was meinst Du mit ‚guter Mensch‘?“ Hier nützt es nun natürlich nichts mehr, erneut auf Albert Schweizer zu verweisen. Das es den nicht mehr gibt, ist jedermann völlig klar. Was man eigentlich sagen will, ist eher, es gäbe überhaupt niemanden mehr, der in einem bestimmten Sinne so sei, wie Schweizer. Dieser „bestimmte Sinn“ wäre dann gerade das, was einen guten Menschen ausmacht. Man kommt um einen explizit gegebenen klaren Begriff nicht herum. Wir suchen also zuerst einen präzisen Begriff des Entscheidungsverfahrens.