

A man provided with paper, pencil,
and rubber, and subject to strict disci-
pline, is in effect a universal machine.

Alan Turing

... und es schlich sich in der Tat ein
abscheuliches Misstrauen gegen
menschliche Figuren ein. Um nun
ganz überzeugt zu werden, dass man
keine Holzpuppe liebe, wurde von
mehrern Liebhabern verlangt, dass die
Geliebte etwas taktlos singe und tanze,
dass sie beim Vorlesen sticke, stricke,
und mit dem Möpschen spiele.

E.T.A. Hoffmann, Der Sandmann

Das Fließband im Kopf Computer und Rationalisierung*

Bettina Heintz

Als Olympia entlarvt war als ein blosses Automat, schlich sich in der Tat ein abscheuliches Misstrauen ein. Menschsein war von nun an einem tiefgreifenden Verdacht ausgesetzt. «'Man kann wahrhaftig nicht dafür stehen', sagte dieser und jener.»¹ Damals hatten Automaten noch durch Bewegungen getäuscht und durch einen Körper, der dem menschlichen getreu nachgebildet war.² Die heutigen Automaten imitieren, ohne zu gleichen. Die Imitation des Computers ist abstrakt, unsichtbar. Er simuliert nicht Gesten oder Bewegungen, sondern Denken. Mit Schritten, die aus dem Takt fallen, mit irregulären Bewegungen allein, lässt sich der Verdacht nicht mehr zerstreuen. «Menschlichkeit» muss sich anders beweisen, über regelloses Denken, nicht über taktloses Tanzen. Über ein Denken mit anderen Worten, das nicht «mechanisch» ist. Nur: sobald man dieses Denken reflektierend beschreibt, scheint es auch simulierbar

* Ich danke Clemens Heller und der «Maison des Sciences de l'Homme» in Paris für den mir gewährten Forschungsaufenthalt. Er hat zu dieser Arbeit wesentlich beigetragen.

1 E.T.A. HOFFMANN, Der Sandmann (1816), in: Gesammelte Werke, Bd. 5, Zürich 1946, S. 173.

2 So wurden sie damals auch definiert. Ein Automat ist, so die Allgemeine Enzyklopädie der Wissenschaften und Künste von 1820, «(1) eine sich selbst bewegende Maschine (...) (2) Im engern Sinne – ein mechanisches Kunstwerk, welches gewöhnlich in der Figur eines Menschen oder Thieres, durch einen im Innern verborgenen Mechanismus in Bewegung gesetzt, wie ein belebtes Wesen selbstthätig zu wirken scheint (...) Je täuschender und naturgemässer das Automat die Bewegungen und Verrichtungen belebter Wesen nachahmt, und je versteckter und dauernder die verborgenen Kräfte die Thätigkeit desselben unterhalten, desto vollkommener ist diese Maschine», zit. in Peter GENDOLLA, Die lebenden Maschinen. Zur Geschichte des Maschinenmenschen bei Jean Paul, E.T.A. Hoffmann und Villiers de l'Isle Adam, Marburg 1980, S. 15.

zu werden. Diesen Zusammenhang hat der englische Mathematiker Alan Turing 1936 in einer berühmten These formuliert. Die These selbst gleicht der Geschichte vom Igel und Hasen. Dem Denken, das sich selbst reflektiert, schaut immer schon seine Simulation entgegen. Was das genau heisst, beschreibe ich in einem zweiten Teil (II), in dem ich Turings Argumentation kurz umreisse.

Simulation menschlichen Verhaltens setzt jedoch voraus, dass dieses klaren Regeln folgt und diese Regeln auch bewusst, beschreibbar und verstehbar sind. Diese Bedingung ist keineswegs generell erfüllt, sondern, so meine These, an spezifische historische Voraussetzungen geknüpft, die erst hervorgebracht haben, was Turing als Regelfall postulierte. Das erläutere ich zum Schluss in einem vierten Teil (IV).

Alan Turing hat die Behauptung aufgestellt, dass jeder Algorithmus als Operation einer sogenannten *Turingmaschine* dargestellt werden kann. Turingmaschinen sind, um den treffenden Ausdruck von Sybille Krämer zu übernehmen, *symbolische Maschinen*. Und dies in zweierlei Hinsicht. Zum einen sind sie keine wirklichen, physikalisch realisierten Maschinen (und auch nicht deren technische Beschreibungen), sondern mathematische Konstrukte; zum andern besteht ihre «Operationsweise» darin, Symbole schrittweise zu transformieren.³ Was von einer Turingmaschine ausgeführt werden kann, lässt sich – mit gewissen Einschränkungen – auch von einem Computer ausführen. Digitalcomputer sind physikalische Realisierungen von Turingmaschinen und umgekehrt: Das Konzept der Turingmaschine ist eine mathematische, von der physikalischen Ausführung abstrahierende Modellierung des Funktionsprinzips und des Funktionsbereichs von Digitalcomputern.

So präsentiert sich die Beziehung zwischen Turingmaschine und Computer heute. Als man in den frühen vierziger Jahren an der Entwicklung von Digitalcomputern zu arbeiten begann, wurde dieser Zusammenhang kaum wahrgenommen. Die technische (und kulturelle) Konstruktion des Computers blieb lange Zeit praktisch unbeeinflusst von den theoretischen Überlegungen, die Alan Turing im Rahmen der mathematischen Berechenbarkeitsdiskussion der dreissiger Jahre entwickelt hatte. Wie sich die Entwicklung der «physikalischen» Maschine vollzogen hat und wie diese in den fünfziger Jahren im Kontext der sogenannten Automatisierungsdebatte gesellschaftlich reflektiert und verarbeitet wurde, beschreibe ich in einem ersten Teil (I).

Der Computer bricht mit dem klassischen Konzept von Maschine. Anstatt Körperbewegungen zu substituieren, werden kognitive Prozesse mechanisiert. Nachdem man vor 200 Jahren den Körper als ökonomischen Wachstumsfaktor entdeckte, ihn mit wechselnden Methoden disziplinierte, ausmass, analysierte und trimmte und ihn auf diese Weise «gelehrig» und anschliessend überflüssig machte,⁴ ist man heute dabei, mit der gleichen Absicht und ähnlichen Methoden das Denken zu ergründen. Voraussetzung dafür ist ein (psychologisches) Modell, das Denken als einen formalen und in elementare Operationen zerlegbaren Prozess ansieht. Was in der klassischen mechanistischen Theorie des Geistes bereits angelegt war, wurde in den dreissiger Jahren von

3 Sybille KRÄMER, *Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung im geschichtlichen Abriss*, Darmstadt 1988.

4 Zu diesem historischen Prozess der «body formation» vgl. Rudolf BRAUN, *Der «gelehrige» Körper als wirtschaftlich-industrieller Wachstumsfaktor*, (im Druck).

Alan Turing neu formuliert und in einen präzisen Zusammenhang gebracht zur Vorstellung der Mechanisierbarkeit. Turings Argumentation hat, so denke ich, zwei geistige Wurzeln, eine wissenschaftsimmanente und eine aussermathematische. Zum einen steht sie, wie die beiden ausgezeichneten mathematikhistorischen Untersuchungen von Sybille Krämer und Judson C. Webb zeigen, im Kontext einer langen mathematisch-philosophischen Auseinandersetzung mit der Idee der Formalisierung.⁵ Gleichzeitig scheint mir Turings Konzeption aber auch von Denkmustern beeinflusst zu sein, die ausserhalb der Mathematik entwickelt worden waren und die man damals im Rahmen der Rationalisierungsbewegung diskutierte und praktisch erprobte. Auf diesen doch erstaunlichen Zusammenhang zwischen Mathematik, Computer und Rationalisierung gehe ich in einem dritten Teil (III) näher ein.

I

Der Vortrag, den Adolf Galliker 1956 vor den Mitgliedern des Schweizerischen Kaufmännischen Vereins hielt, befasste sich mit einem Thema, das damals überaus aktuell war: *Computer und Automation*. Die Zukunftsvision, die Galliker seinen Zuhörern und Zuhörerinnen ausmalte, war geprägt von Angst und Faszination. Faszination über diese «Wunderwerke der Technik», Angst vor den Folgen dieser «elektronischen Monstren» für den gesamten «Daseinsapparat». Die erste industrielle Revolution habe uns, so Galliker, Maschinen gebracht, die die Muskelkraft ersetzten. Jetzt stünden wir vor einer «zweiten industriellen Revolution», und diese sei im Begriff, «auch die menschliche Kopfarbeit abzulösen mit Automaten, die, elektronisch betätigt, mit der Exaktheit eines Uhrwerks Arbeitsprozesse in Gang halten, die Kühlschränke, Autos, Waschmaschinen, Möbel, Textilwaren oder Granaten fertig fabrizieren, ohne menschliche Arbeitskraft anders zu betätigen als mit einigen Kunstgriffen des Diplomingenieurs, der von seiner Plexikabine aus die Steuertechnik des Elektronenhirns handhabt».⁶

Galliker war mit dieser Gegenwartsdiagnose keineswegs allein. In allen Industrieländern fand eine eigentliche Automatisierungsdebatte statt, die in der Schweiz zwischen 1956 und 1959 ihren Höhepunkt erreichte. «Automation» war, wie alle Autoren vermerkten, ein Wort, das ebenso neu war wie das Phänomen, das es zu bezeichnen suchte. Eine «allgemein anerkannte Begriffsbestimmung» habe sich zwar noch nicht durchgesetzt, schrieb Friedrich Pollock 1956, doch stosse diese «neue Phase der Mechanisierung» auf immer grössere Beachtung, auch in Europa.⁷

5 Vgl. KRÄMER (wie Anm. 3) und Judson C. WEBB, *Mechanism, Mentalism, and Metamathematics*, Dordrecht 1980.

6 Adolf GALLIKER, *Automation – Animation*, Schriftenreihe des Schweizerischen Kaufmännischen Vereins, ohne Ortsangabe 1956, S. 3f.

7 Vgl. Claus HÄSSIG, *Angst vor dem Computer? Die Schweiz angesichts einer modernen Technologie*, Bern und Stuttgart 1987, S. 39. Die Automatisierungsdebatte hat eine wahre Flut von Büchern, Artikeln und Broschüren hervorgebracht. Ich beziehe mich im folgenden v.a. auf Wilhelm BITTORF, *Automation. Die zweite industrielle Revolution*, Darmstadt 1956; Friedrich DESSAUER, *Streit um die Technik*, Frankfurt/Main 1956, insbes. Kap. IV; GALLIKER (wie Anm. 6); Friedrich POLLOCK, *Die wirtschaftlichen und sozialen Folgen der Automatisierung*, in: Fritz

Was war mit «Automation» gemeint? Auf begrifflicher Ebene kristallisierten sich vor allem drei Definitionsmerkmale heraus: (a) Integration von bis anhin getrennten Elementen des Produktionsprozesses zu einem geschlossenen System, (b) Mechanisierung von Steuerungs- und Kontrollfunktionen, deren technische Voraussetzung (c) der elektronische Digitalcomputer war. Was als qualitativer Sprung gegenüber früheren Rationalisierungsformen vermerkt wurde und das Wesen der Automation auszumachen schien, war die Mechanisierung von Aufgaben, die bislang als genuin menschlich gegolten hatten – Kontrolle, Überwachung, Steuerung, d.h. Informationsverarbeitung allgemein. Die Automation markierte, darüber herrschte ein weitgehender Konsens, einen Bruch in der Geschichte der Mechanisierung, eine «zweite industrielle Revolution», deren technische Grundlage Maschinen waren, die, wie Wilhelm Bittorf schrieb, «nicht nur die Muskelkraft und die routinemässigen Handgriffe des Menschen ersetzen und vervielfachen (...), sondern auch seine nichtschöpferischen Hirnfunktionen bei der Lenkung, Überwachung, Korrektur und Inspektion des mechanisch-maschinellen Produktionsprozesses».⁸ Automation wurde nicht nur in den Fabrikhallen konstatiert, auch im Büro schien sich eine neue Form der Mechanisierung abzuzeichnen, in der Buchhaltung, Lagerkontrolle und Korrespondenz sowie bei «Entscheidungen, welche auf Grund im voraus übersehbarer Kriterien getroffen werden können». Mit «unbewehrter menschlicher Gehirnkapazität» sei die Arbeit nicht mehr zu leisten, schrieb Bittorf. Man habe «Denkhilfen» gebraucht, und die gab es nun in Form der neuen elektronischen Geräte – mit Folgen für die Angestellten. Ihr Tätigkeitsbereich schrumpfte auf die «Belieferung der Maschinen mit dem Rohmaterial der Information ('input'), die Weitergabe des 'output' – das heisst der Mitteilungen aller Art, die von den Maschinen geliefert werden – sowie die Ausführung nichtrepetitiver Aufgaben, zum Beispiel die Erledigung der nichtstandardisierten Korrespondenz (...), der persönliche Verkehr mit Kunden (...) und ähnliche, 'eigenes Urteil auf höherer Stufe' erfordernde Funktionen».⁹

Was auf diese Weise in unzähligen Büchern, Artikeln, Broschüren und Vorträgen beschrieben wurde – voll automatisierte Fabriken, menschenleere Büros –, hatte mit der Wirklichkeit freilich recht wenig zu tun. Die Automation fand zur Hauptsache in den Köpfen statt. Realität wurde sie erst seit Ende der siebziger Jahre.¹⁰

ERLER u.a. (Hg.), *Revolution der Roboter*, München 1956, S. 106–140; Friedrich POLLOCK, *Automation*, Frankfurt/Main 1956; Alwin WALTHER, *Moderne Rechenanlagen als Muster und als Kernstück einer vollautomatisierten Fabrik*, in: ERLER u.a., (wie oben), S. 7–64; Norbert WIENER, *Mensch und Menschmaschine*, Frankfurt/Main 1952.

⁸ BITTORF (wie Anm. 7), S. 12.

⁹ POLLOCK, *Automation* (wie Anm. 7), S. 13 und 33.

¹⁰ Vgl. für den Industriebereich u.a. Horst KERN und Michael SCHUMANN, *Das Ende der Arbeitsteilung? Rationalisierung in der industriellen Produktion*, München 1984, und für den Bürobereich Martin BAETHGE und Herbert OBERBECK, *Zukunft der Angestellten. Neue Technologien und berufliche Perspektiven in Büro und Verwaltung*, Frankfurt/Main 1986. In einer Vorläuferstudie, die Ende der sechziger Jahre durchgeführt wurde, sind Kern und Schumann auf keinen einzigen Fall von Automation gestossen. «Wenn überhaupt Automatisierung stattfindet», schreiben die beiden Autoren in ihrem 1977 erschienenen Bericht, «dann führt die aktuelle technische Entwicklung nach unseren Ergebnissen bestenfalls zu teilautomatisierten Aggregatsystemen», vgl. Horst KERN und Michael SCHUMANN, *Industriearbeit und Arbeiterbewusstsein*, Frankfurt/Main 1977, S. 132. Was man in den fünfziger Jahren als nahezu realisiert betrachtete,

Mitte der fünfziger Jahre, als die Automatisierungsdebatte ihren Höhepunkt erreichte, konnte von Automation noch keine Rede sein. Elektronische Digitalcomputer hatten Seltenheitswert, und die Entscheidung, einen Computer zu installieren, galt durchaus noch als «pioneering decision».¹¹ Der erste kommerzielle Computer, der UNIVAC I – er war bezeichnenderweise von einer kleinen, neu gegründeten Firma entwickelt worden –, wurde erst 1951 in Betrieb gesetzt. 1955 verfügten in den USA neun Firmen über einen elektronischen Computer, in England waren es zwei. Erst von 1956 an nahm die Computerdichte allmählich zu. 1957 waren in England 10 kommerzielle Computer in Gebrauch, 1959 waren es bereits 76. Der grosse Durchbruch erfolgte aber erst in den sechziger Jahren.¹² Zwischen Erfindung und Innovation lagen also gut 10 Jahre, und es dauerte mindestens ebenso lange, bis sich der Diffusionsprozess entfaltete. Das ist zwar eine vergleichsweise kurze Zeitspanne,¹³ zeigt aber deutlich, dass das, was die Automatisierungsdebatte als Faktum unterstellte, noch keineswegs Wirklichkeit war.

Technische Grundlage der Automation war der elektronische Digitalcomputer, und den gab es erst seit gut 10 Jahren: Im Herbst 1945 wurde der ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) zum ersten Mal in Betrieb gesetzt.¹⁴ Dass der ENIAC einmal als Vorläufer des heutigen Computers gelten würde, war zur Zeit

nennt sich heute CIM (Computer Integrated Manufacturing) und CIO (Computer Integrated Office). Beides ist aber auch heute noch weit davon entfernt, auf breiter Basis implementiert zu sein.

- 11 Vgl. R.H. GREGORY und H.W. GEARING, *Electronic Computers as Tools for Management in the United States of America: 1956*, in: *The Computer Journal*, 1959, 1, 4, S. 179–191 (S. 179).
- 12 Vgl. zu den USA GREGORY und GEARING (wie Anm. 11) und zu Grossbritannien J.A. GOLDSMITH, *The State of the Art – (a) Commercial Computers in Britain, June 1959*, in: *The Computer Journal*, 1959, 2, 1, S. 97–99. Der erste Computer in der Schweiz war der Z4 von Konrad Zuse, der 1950, zu einem Zeitpunkt, als andere Länder bereits eigene Computer entwickelt hatten, von der ETH angemietet wurde. Erst 1956, also vergleichsweise spät, nahm der erste in der Schweiz konstruierte Computer, der an der ETH entwickelte ERMETH, den Betrieb auf. Vgl. zur Frühgeschichte des Computers in der Schweiz u.a. H.R. SCHWARZ, *The Early Years of Computing in Switzerland*, in: *Annals of the History of Computing*, 1981, 3, 2, S. 121–132. Erst von 1961 an wurde der Computerbestand in der Schweiz systematisch erhoben. Die Daten zeigen, dass die eigentliche Computerisierung erst Mitte der sechziger Jahre begann. Zwischen 1961 und 1968 hat sich der Computerbestand mehr als verzweifzigfacht: Anfang der sechziger Jahre waren etwa 30 Computer in Betrieb, 1968 waren es bereits ca. 800. Damit war die Schweiz schon damals das Land mit der höchsten Computerdichte in Europa, vgl. Emil J. WALTER, *Statistische Erhebungen über die Verbreitung von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen (EDV) in der Schweiz*, in: *Schweizerische Zeitschrift für Volkswirtschaft und Statistik*, 1969, 105, 4, S. 515–533.
- 13 Vgl. zu diesen Fristen (sowie zur Problematik der Schumpeterschen Dreiteilung) Nathan ROSENBERG, *Problems in the Economist's Conceptualization of Technological Innovation*, in: *DERS., Perspectives on Technology*, Cambridge 1976, S. 61–84.
- 14 Um die ballistischen Berechnungen auszuführen, für die er konstruiert worden war, kam der ENIAC zwar zu spät. Dafür aber rechtzeitig, um in Los Alamos, wo man die Atombombe entwickelt hatte, eingesetzt zu werden, vgl. Herman H. GOLDSTINE, *The Computer from Pascal to von Neumann*, Princeton 1972, S. 225ff. Zum ENIAC gibt es eine zwar umfangreiche, aber, wie in der Computergeschichte leider üblich, meist vorwiegend technisch orientierte Literatur, die zu allem Übel häufig noch vom Frontier-Geist der ehemaligen Computerpioniere geprägt ist. Eine der wenigen Ausnahmen in dieser Hinsicht ist Thomas P. HUGHES, *ENIAC: Invention of a Computer*, in: *Technikgeschichte*, 1975, 42, 2, S. 148–165. Die Geschichte des Computers ist bislang noch eine gut gehütete Domäne von Physikern und Ingenieuren. Für Historiker und Soziologen wäre sie erst noch zu entdecken.

seiner Entwicklung allerdings noch keineswegs ausgemacht. Diese Zuschreibung entwickelte sich erst später, retrospektiv, und bildete den Schlusspunkt eines Selektionsprozesses, in dessen Verlauf alternative Computerkonzeptionen sukzessiv ausgefiltert wurden. Dazu gehören der Mark I von Howard H. Aiken (1944), das Modell V von George R. Stibitz (1946) und vor allem der Z3 von Konrad Zuse, der bereits 1941 funktionsfähig war und heute als der erste programmgesteuerte Digitalcomputer gilt.¹⁵ Alle Modelle hatten entscheidende Merkmale gemeinsam (Programmsteuerung, Digitalprinzip, Universalität), unterschieden sich jedoch hinsichtlich ihrer technischen Ausführung. Der Mark I, das Modell V und Zuses Z3 und Z4 waren elektromechanische, der ENIAC, die englischen Colossi und die Maschine von Atanasoff und Berry elektronische Computer. Bei einigen Modellen, z.B. beim Z3 und Z4, wurden die Befehle sequentiell ausgeführt, andere, wie etwa der ENIAC, hatten eine Parallelarchitektur. Einige Computer beruhten auf dem Binärsystem, andere auf dem dezimalen und dritte schliesslich auf komplexen Mischformen.¹⁶ Praktisch alle Kombinationsmöglichkeiten kamen vor, und es war noch keineswegs entschieden, welches Prinzip das beste war. Fünf Jahre später war der Selektionsprozess dann abgeschlossen. «Computer» hiess nun: digital (und nicht analog), binär (und nicht dezimal), elektronisch (und nicht elektromechanisch), sequentielle Befehlsverarbeitung (und nicht parallele), intern gespeichertes Programm (und nicht externe Programmierung). Damit hatte sich eine Variante durchgesetzt, die sogenannte *Von-Neumann-Architektur*, die es zwar in dieser Kombination in der Frühphase noch nicht gegeben hatte, deren Ausgangspunkt jedoch der ENIAC gewesen war. Die andern Computermodelle gerieten allmählich in Vergessenheit, während von Neumanns Konzeption zu einem Paradigma avancierte, zu einem handlungsleitenden Modell, an dem sich die Computerentwicklung von nun an orientierte.¹⁷ Es begann, was Thomas Kuhn für die Wissenschaft als «Normalphase» bezeichnet.¹⁸

- 15 Zu diesen Frühformen des modernen Digitalcomputers lassen sich u.U. auch die englischen Colossi zählen, die als Dechiffriermaschinen entwickelt worden waren (1943) sowie die Maschine von John V. Atanasoff und Clifford E. Berry, die allerdings nie ganz fertiggestellt wurde. Zur Frühgeschichte des Computers vgl. u.a. Paul E. CERUZZI, *Reckoners. The Prehistory of the Digital Computer. From Relays to the Stored Program Concept, 1935–1945*, Westport 1983; GOLDSTINE (wie Anm. 14); N. METROPOLIS u.a. (Hg.), *A History of Computing in the Twentieth Century*, New York 1980; Hartmut PETZOLD, *Rechnende Maschinen. Eine historische Untersuchung ihrer Herstellung und Anwendung vom Kaiserreich bis zur Bundesrepublik*, Düsseldorf 1985; Brian RANDELL (Hg.), *The Origins of Digital Computers*, Berlin/Heidelberg/New York 1982; Michael Roy WILLIAMS, *A History of Computing Technology*, Hempstead 1985.
- 16 Zu diesem Vergleich vgl. die Zusammenstellungen in CERUZZI (wie Anm. 15), S. 141, und bei Arthur W. BURKS und Alice R. BURKS, *The ENIAC: First General-Purpose Electronic Computer*, in: *Annals of the History of Computing*, 1981, 3, 4, S. 310–389, S. 382f.
- 17 Unter Umständen auch in einem durchaus negativen Sinn. In Frankreich z.B. lautete der Auftrag, einen Computer zu entwickeln, der sich von der «conception americaine» deutlich unterschied. Das Planungskonzept war entsprechend einfach: «Il ne s'agissait pas uniquement de se distinguer mais de prendre volontairement la direction opposée de ce qui se faisait ailleurs», vgl. Jérôme RAMUNNI, *La physique du calcul. L'histoire de l'ordinateur*, Paris 1989, S. 105. Mit nur geringem Erfolg allerdings. Die «conception française», so wie sie unter Louis Couffignal geplant worden war, erwies sich als unrealisierbar.
- 18 Diese «Normalphase» dauerte gut zwei Jahrzehnte, bis Anfang der siebziger Jahre die ersten Parallelcomputer auf den Markt kamen. Damit wurden Entwicklungslinien wieder aufgegriffen, die Anfang der fünfziger Jahre abgebrochen worden waren. Dass diese Abkehr von der sequentiell-

In der Computergeschichte wird dieser Selektionsprozess normalerweise technikimmanent erklärt, als «*survival of the fittest technology*» gewissermassen. Durchgesetzt habe sich jenes Modell, das in ökonomischer und technischer Hinsicht am besten «funktionierte». Was der «Technikdarwinismus» als quasi-natürlichen Vorgang begreift, war jedoch Ergebnis eines diskursiven Prozesses, in dessen Verlauf festgelegt wurde, wie ein Computer in Zukunft auszusehen hatte. Ob die technischen Lösungen, für die man sich damals entschied, auch «objektiv» die besten waren, ist so wenig eindeutig zu beantworten wie die Frage nach dem Wahrheitsvorsprung eines wissenschaftlichen Paradigmas. Eine solche Beurteilung setzte objektive und universell akzeptierte Kriterien voraus, und auch in diesem Fall könnte immer noch strittig sein, ob eine spezifische technische Lösung (bzw. ein wissenschaftliches Paradigma) diese Kriterien erfüllt oder nicht.¹⁹ Die Beurteilung einer technischen Lösung als «gut» (und einer andern als vergleichsweise «schlechter») ist nicht durch den Gegenstand selbst determiniert, so wenig wie sich die Beurteilung von wissenschaftlichen Hypothesen zwingend aus den Forschungsergebnissen herleitet. Zu welcher Beurteilung man gelangt, welche technischen Varianten gewählt werden (und welche in Vergessenheit geraten), ist abhängig von den Deutungssystemen, an denen man sich orientiert, und von der Struktur des diskursiven Prozesses, in dessen Verlauf sich eine gemeinsame Sicht herauskristallisiert. Über die Leistungsfähigkeit von technischen Lösungen wird, pointiert formuliert, ebenso entschieden wie über den Wahrheitswert von Hypothesen, und zwar in Kommunikationsprozessen, die keineswegs dem Ideal des offenen Diskurses nachzukommen brauchen. Technische Entwicklung präsentiert sich in dieser Perspektive nicht mehr als gradliniger Fort-Schritt, als eingleisiger Weg hin zur immer perfekteren technischen Lösung, sondern als unsteter und diskontinuierlicher Prozess, der sich phasenweise in verschiedenste Richtungen verzweigt, um dann wieder auf einen Punkt hin konzentriert zu werden. Pinch und Bijker sprechen in diesem Zusammenhang von «Schliessung»: «*Closure in technology involves the stabilization of an artifact and the 'disappearance' of problems. To close a technological 'controversy', one need not solve the problems in the common sense of that word. The key point is, whether the relevant social groups see the problem as being*

len Kontrollstruktur des klassischen Modells Anfang der siebziger Jahre geschah, in einer Zeit gesellschaftlichen Umbruchs, hat vielleicht doch mehr als bloss technische Gründe. Für den theoretischen Hintergrund dieser Vermutung vgl. Hansjörg SIEGENTHALER, *Wachstumsschwankungen und sozialer Wandel* (im Druck).

19 Ob es solche objektiven Kriterien gibt, ist bekanntlich ein kontroverser Punkt in der Wissenschaftstheorie. Ich orientiere mich hier und im folgenden an der anti-objektivistischen Position, wie sie etwa von Thomas KUHN, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt/Main 1967, vertreten wird. Inwieweit sich die Kuhnschen Konzepte auch auf die Technikentwicklung übertragen lassen, ist strittig; vgl. zu dieser Diskussion Peter WEINGART, *Strukturen technologischen Wandels*. Zu einer soziologischen Analyse der Technik, in: Rodrigo JOKISCH (Hg.), *Techniksoziologie*, Frankfurt/Main 1982, S. 112–141, sowie die beiden Sammelbände von Rachel LAUDAN (Hg.), *The Nature of Technological Knowledge: Are Models of Scientific Change Relevant?*, Dordrecht 1984, und Wiebe E. BIJKER u.a. (Hg.), *The Social Construction of Technological Systems*, Cambridge 1987.

solved.»²⁰ Genau das geschah Anfang der fünfziger Jahre, als sich die sogenannte «Von-Neumann-Architektur» als handlungsleitendes Modell durchsetzte.

Die Grundprinzipien dieses Modells wurden zum ersten Mal 1945 in dem berühmten *First Draft Report on the EDVAC* beschrieben. Autor dieses Reports war der bekannte Mathematiker John von Neumann, der Ende 1944 als Berater zum ENIAC-Team gestossen war. Noch während der Arbeit am ENIAC konzipierte die Gruppe eine neue Maschine, den EDVAC, auf den sich der Bericht bezog. Der *First-Draft-Report* hat auf die weitere Entwicklung einen enormen Einfluss gehabt. Denn darin wurde zum ersten Mal und sehr stringent definiert, was unter einem Digitalcomputer zu verstehen ist.²¹ Obschon der Report erst viele Jahre später publiziert wurde, fand er informell rasche Verbreitung. Wer sich mit Computern beschäftigte, und das war zu dieser Zeit noch eine überschaubare Gruppe, deren Mitglieder sich praktisch alle persönlich kannten, hat den Bericht gelesen und sich an ihm orientiert. Der *First-Draft-Report* stand auch im Mittelpunkt der Tagungen, die man schon bald nach Beendigung des Krieges organisierte, und diese Tagungen selbst waren, wie Ceruzzi schreibt, «a forum where the many different theoretical approaches to computing could be criticized, and where a consensus about what computers *ought* to look like first took form».²²

1946 trennte sich John von Neumann vom ENIAC-Team und ging zurück nach Princeton ans Institute of Advanced Studies (IAS), wo er zusammen mit Julian Bigelow, Arthur W. Burks und Herman H. Goldstine den IAS-Computer entwickelte. Wesentlicher als die Maschine selbst, die erst relativ spät im Juni 1952 fertiggestellt wurde, waren die Berichte, in denen John von Neumann und seine Mitarbeiter ihre Arbeit laufend dokumentierten.²³ Ähnlich wie der *First-Draft-Report* wurden diese

20 Trevor J. PINCH und Wiebe E. BIJKER, *The Social Construction of Facts and Artifacts: Or How the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other*, in: BIJKER u.a. (wie Anm. 19), S. 17–51 (S. 44). Pinch und Bijker orientieren sich in ihrer Technikanalyse an der Kuhnschen Wissenschaftstheorie, mit der sie allerdings auch die Problematik eines ausschliesslich handlungstheoretischen Ansatzes teilen. Anstatt Handlung und Kommunikation konzeptuell zu vermengen, schiene es mir sinnvoller zu sein, zwischen Forschungs- bzw. technischem Handeln auf der einen und dessen Beschreibung in Form von Publikationen, Berichten etc. auf der andern Seite strikt zu unterscheiden. Die Entwicklung eines technischen Artefakts ist eine Sache, seine kommunikative Thematisierung eine andere. Wenn Stichweh für die Wissenschaft schreibt, dass Forschungshandlungen «nur indirekt über ihre Beobachtung von der Ebene des wissenschaftlichen Kommunikationszusammenhanges her zu einem Systemzusammenhang zusammengeschlossen» werden, vgl. Rudolf STICHWEH, *Die Autopoiesis der Wissenschaft*, in: Dirk BAECKER u.a. (Hg.), *Theorie als Passion*, Frankfurt/Main 1987, S. 447–481 (472f.), dann gilt dasselbe meiner Ansicht nach auch für die Technik. Erfindungen sind nicht einfach da, sie müssen als solche erst definiert werden, und dies geschieht über (selektive und ungleich verteilte) Kommunikation. Die Entwicklungsgeschichte des Computers ist ein besonders gutes Beispiel für den Nutzen einer solchen konzeptuellen Differenzierung. Vgl. dazu ausführlicher Bettina HEINTZ, *Mensch, Maschine, Mechanismus* (in Vorbereitung).

21 John von NEUMANN, *First Draft Report on the EDVAC*, abgedruckt in RANDELL (wie Anm. 15), S. 383–392.

22 CERUZZI (wie Anm. 15), S. 132.

23 Von Neumann hat diese Arbeit als wissenschaftliche verstanden und eine entsprechend offene Publikationspolitik verfolgt. Um etwaige Patentansprüche zu verhindern, trugen alle IAS-Rapporte den expliziten Vermerk, dass sie von öffentlichem Interesse seien. Von Neumanns dezidiert universalistische Haltung war mit ein Grund für das Zerwürfnis mit Presper J. Eckert und John W. Mauchly vom ENIAC-Team. Die Ablehnung der Patente, die Eckert und Mauchly für die Entwicklung des ENIACs und EDVACs angemeldet hatten, wurde mit der weiten Verbreitung des

Rapporte breit rezipiert. Keine andere Gruppe entwickelte eine vergleichbare publizistische Aktivität, und keine andere Gruppe hatte eine vergleichbare Stellung inne, was wissenschaftliches Ansehen und Kommunikationsressourcen anbetraf. Diese diskursiven Kompetenzen haben den Verlauf des Selektionsprozesses entscheidend mitbestimmt.²⁴ Die Lösungen, die von Neumann und seine Mitarbeiter vorschlugen, wurden im allgemeinen übernommen, ohne sie systematisch abzuwägen gegen andere Varianten. Indem man die Grundüberlegungen übernahm, die in den IAS-Rapporten formuliert waren (und auf diese Weise Unsicherheit und Komplexität beträchtlich reduzierte), gewann man Zeit für die Bearbeitung der noch offenen Probleme – ein gutes Beispiel für den Nutzen symbolisch generalisierter Kommunikation. Mehrere Maschinen, die in diesen Jahren entwickelt wurden, sind Kopien des IAS-Computers (oder Kopien von Kopien). Dazu gehören z.B. der MANIAC (Los Alamos, 1952), der ORDVAC (Universität von Illinois, 1952) und der EDSAC, der von Maurice Wilkes an der Universität von Manchester entwickelt wurde und bereits 1949, d.h. drei Jahren vor dem IAS-Computer, fertiggestellt war.²⁵ Wenn der IAS-Computer das «Exemplar» war, das beispielhafte Meister-Werk, dann waren die Rapporte von John von Neumann die Theorie dazu. Zusammengefasst legten sie für lange Zeit fest, wie ein Computer auszusehen hat: «Les textes écrits autour de l'IAS (...) ont fondé la méthodologie des ordinateurs».²⁶

Anfang der fünfziger Jahre war also die technisch-logische Grundkonstruktion des Computers abgeschlossen. Was anschliessend folgte, waren immanente Verbesserungen, «Strukturerfindungen» im Rahmen der einmal gewählten Architektur – «Normaltechnik» gewissermassen.²⁷ Nicht abgeschlossen war hingegen die *kulturelle* Konstruktion des Computers, seine Deutung und Funktionsbestimmung. Ursprünglich waren Computer zum Zwecke numerischer Berechnungen entwickelt worden. Ihr Anwendungsgebiet sah man im Bereich des wissenschaftlichen und technischen Rech-

First-Draft-Reports begründet, vgl. dazu RAMUNNI (wie Anm. 17), S. 53 und 63, und WILLIAMS (wie Anm. 15), S. 347ff. und 354.

- 24 Konrad Zuse und Alan Turing waren zwar beide massgeblich an der Entwicklung des Digitalcomputers beteiligt, ihre Vorstellungen blieben aber weitgehend unbekannt und beeinflussten die weitere technische Entwicklung kaum. Turings Konzeption des ACE (Automatic Computing Engine) verschwand in den Archiven des National Physical Laboratory und wurde erst in den späten sechziger Jahren wiederentdeckt. Der ACE-Report ist, wie RAMUNNI (vgl. Anm. 17) schreibt, «une source d'idées dans la recherche de solutions alternatives à ce qui était désormais couramment appelé l'architecture des ordinateurs 'à la von Neumann'» (S. 87), nur waren es Ideen, die damals, als sich von Neumanns Konzeption durchsetzte, keinen Eingang fanden in den Diskurs über das Design von Computern. Konrad Zuse hatte nicht nur den ersten programmgesteuerten Digitalcomputer entwickelt, den Z3, sondern mit seinem «Plankalkül» auch die erste Programmiersprache formuliert. Beides wurde bis weit in die fünfziger Jahre nicht zur Kenntnis genommen, teilweise auch wider besseres Wissen, vgl. dazu die Bemerkungen in Konrad ZUSE, *Der Computer. Mein Lebenswerk*, Berlin/Heidelberg/NewYork 1984, S. 113f.
- 25 Diese Ungleichzeitigkeit macht noch einmal deutlich, dass es sinnvoll ist, zwischen (technischem) Handeln und Kommunikation zu unterscheiden (vgl. Anm. 20).
- 26 Vgl. RAMUNNI (wie Anm. 17), S. 69.
- 27 Vgl. zur Unterscheidung von «Funktionserfindungen» und «Strukturerfindungen», Günter ROPOHL, *Eine Systemtheorie der Technik*, München/Wien 1979. Diese Periodisierung der Computerentwicklung steht allerdings in erheblichem Gegensatz zur populären Konzeption der «Computergeneration», die technische Neuerungen, z.B. die Einführung des Transistors, als Klassifikationskriterium verwendet.

nens, und entsprechend wurden sie anfänglich ausschliesslich an Universitäten und militärischen Forschungslaboratorien eingesetzt. Die Idee, dass Computer mehr können als bloss rechnen (und folglich auch vielseitiger verwendbar waren), setzte sich erst allmählich durch.²⁸ Noch Ende der vierziger Jahre waren viele davon überzeugt, dass ein oder zwei Computer pro Land den Bedarf an Rechenkapazität bei weitem abdecken würden. «There will never be enough problems, enough work for more than one or two of these computers», beschied Howard H. Aiken in einem Gutachten,²⁹ und noch 1956, als man in der populären Diskussion die Büros von «Elektronenhirnen» bevölkert sah, konnte er keine Gemeinsamkeiten entdecken zwischen den «computers», wie er sie mitentwickelt hatte, und den Maschinen, die man zu dieser Zeit für kommerzielle Zwecke zu verwenden begann: «If it should turn out that the basic logics of a machine designed for the numerical solution of differential equations coincide with the logics of a machine intended to make bills for a department store, I would regard this as the most amazing coincidence that I have ever encountered.»³⁰

Die anfängliche Zwecksetzung des Computers spiegelt sich auch in seiner Bezeichnung. Mit «computer» bezeichnete man ursprünglich die menschlichen – und zumeist weiblichen – Rechner, die von Hand die rein mechanische Zahlenarbeit leisteten für komplexe wissenschaftliche oder technische Berechnungen. Welche Rechenoperationen sie in welcher Reihenfolge auszuführen hatten, war dabei im Detail vorgeschrieben. Das technische Rechnen sei schon vor der Erfindung des Computers «sehr gut 'programmiert'» gewesen, schreibt Konrad Zuse in seiner Autobiographie, den der Versuch, dieses Rechenverfahren noch weiter zu rationalisieren, zur Entwicklung des Digitalcomputers geführt hatte.³¹ «Programmierer» war der Ingenieur oder Wissenschaftler, der die mathematische Aufgabe in einfachste Rechenoperationen zerlegte und sie anschliessend in einem sogenannten «Rechenplan» zusammenfasste. Dieser Rechenplan, er entspricht dem «Programm», gab die Vorlage ab, nach der die Rechnerinnen – sie repräsentieren das «Rechenwerk» – addierten oder multiplizierten, rein

28 Obschon mit dem Modell der Turingmaschine eine solche Deutung bereits vorgelegen hätte. Ich komme im zweiten Teil darauf zurück.

29 Zit. in Nancy STERN, *From ENIAC to UNIVAC*, Bedford 1981, S. 111. Ähnlich schief lag auch die Prognose von Douglas R. Hartree, der in England massgeblich an der Entwicklung und Einführung von Computern beteiligt war, und zum selben Fazit gelangte offenbar auch der britische Industrieverband, wie Earl Halsbury zehn Jahre später bereits etwas befremdet vermerkt, vgl. Rt. Hon. The Earl of HALSBURY, *Ten Years of Computer Development*, in: *The Computer Journal*, 1959, 1, 4, S. 153–159.

30 Zit. in CERUZZI (wie Anm. 15), S. 43.

31 Konrad ZUSE, *Der Computer. Mein Lebenswerk*, München 1970, S. 35. In Zuses Überlegungen bildeten, wie Petzold schreibt, «Rechenschema und Rechenmaschine eine Einheit, die er in einem neuartigen, möglichst weitgehend automatisierten Gerät technisch zusammenfassen wollte. (...) Offenbar liegt ein Schlüssel für die grundsätzlichen Beiträge Zuses zur Computerentwicklung darin, dass er das System aus Rechenschema und Vierspeziesmaschine (und Rechnerin, B. H.) (...) aus dem damals gängigen Blickwinkel des Rationalisierungsingenieurs als zu mechanisierende und rationalisierende Einheit sah. Im Gegensatz zu andern zu rationalisierenden Arbeitsgängen brauchte die Rechenarbeit nicht mehr zerlegt werden», vgl. PETZOLD (wie Anm. 15), S. 293. Nicht nur Konrad Zuse, auch Alan Turing liess sich, wie ich vermute, von diesem taylorisierten Rechenverfahren inspirieren. Im theoretischen Modell des Computers wie auch in seinem Design spiegelt sich dieser Entstehungskontext wieder. Ich komme im dritten Teil ausführlicher darauf zurück.

mechanisch, Schritt für Schritt, ohne den Zusammenhang zu verstehen. «Ein Rechenautomat», stellte Alwin Walther 1956 trocken fest, «zieht die aus einer gewöhnlichen Büro-Rechenmaschine und der sie bedienenden menschlichen Rechnerin (!) bestehende Zweiheit zu einer Einheit zusammen.»³²

Bis sich durchgesetzt hatte, dass «computer» nun nicht mehr einen Menschen, sondern eine Maschine bezeichnete, oder wie George Stibitz 1945 vorschlug: «Human agents will be referred to as 'operators' to distinguish them from 'computers' (machines)»³³, dauerte es relativ lange. In den ersten Memoranden ist noch von «automatic calculating machine» (Aiken), «electronic computer» (Mauchly) oder von «Universal-Rechenmaschine» (Zuse) die Rede, und noch Mitte der fünfziger Jahre taucht der Computer in Friedrich Pollocks Sachregister als «computer» auf und wird von ihm mit «elektronischer Riesenkalkulator» übersetzt. Gleichzeitig, und das indiziert einen grundlegenden Bedeutungswandel, verweist Pollock unter dem Stichwort «computer» auf den für ihn offenbar synonymen Begriff des «giant brain», eine in den fünfziger Jahren äusserst populäre Bezeichnung, ähnlich beliebt wie im deutschen Sprachraum das «Elektronengehirn». In der Automatisierungsdebatte ist der Computer weit davon entfernt, blosser «calculator» zu sein. Er ist Gehirn, wenngleich ein elektronisches, er imitiert menschliches Denken und nicht bloss simples Rechnen. Bittorf spricht von «Denkmaschinen», Pollock von «Sinnesfunktionen», und bei Galliker hat sich das «Elektrohirn» bereits an die Stelle des Angestellten gesetzt. Das sind nur einige Beispiele. Sie machen aber deutlich, dass man den Computer, den man einige Jahre zuvor noch als gigantische Rechenmaschine betrachtet hatte, als «computer» eben, nun mit «Gehirn» und «Denken» zu assoziieren begann. Anstatt bloss zu rechnen, verarbeitete er nun auf einmal «Informationen», anstatt Zahlen zu stapeln, speicherte er Symbole.³⁴ Sein «Gattungsname 'computer'», schreibt Pollock, «gibt eine falsche Vorstellung von einem Gerät, das die Fähigkeit besitzt, Informationen zu empfangen und in einer Weise rechnerisch und logisch zu verarbeiten, die von nicht hochqualifizierten Fachkräften häufig überhaupt nicht und von den letzteren nur mit einem unvergleichlich viel grösseren Zeitaufwand erreicht werden kann».³⁵ In der kulturellen Wahrnehmung wandelte sich der Computer von einem gigantischen «calculator» zu einer Symbolmaschine, zu einem «physical symbol system», dem menschlichen Gehirn prinzipiell vergleichbar. Dass sich Mensch und Maschine in ihrer «Substanz» unterscheiden, spielt – zumindest in funktionalistischer Perspektive – keine Rolle: «We could be made of Swiss cheese and it wouldn't matter», so Hilary

32 WALTHER (wie Anm. 7), S. 13.

33 Zit. in CERUZZI (wie Anm. 15), S. xi.

34 Eine solche Verbindung wurde zwar schon in von Neumanns *First-Draft-Report* gezogen und dann von der Kybernetik weiter ausgebaut, aber erst in den fünfziger Jahren systematisiert und popularisiert. Damit waren auch die Voraussetzungen geschaffen für die Entstehung der sogenannten Künstlichen Intelligenz, die sich Mitte der fünfziger Jahre als eigenständiger Forschungsweig etablierte, vgl. zur Geschichte der Künstlichen Intelligenz u.a. Allen NEWELL, *Intellectual Issues in the History of Artificial Intelligence*, in: Fritz MACHLUP und Una MANSFIELD (Hg.), *The Study of Information: Interdisciplinary Messages*, New Jersey 1983, S. 187–227, und den Hofbericht von Pamela MCCORDUCK, *Machines Who Think*, New York 1979, insbes. Teil I und II.

35 POLLOCK, *Automation* (wie Anm. 7), S. 20.

Putnams einschlägige Antwort auf die klassisch-kartesische Frage «Are we made of matter or soul-stuff».³⁶ Mit dieser kulturellen Re-Konstruktion des Computers veränderte sich auch die Wahrnehmung seines Funktionsbereiches: Er liess sich offenbar überall dort verwenden, wo Informationen zu verarbeiten waren, in Bereichen mithin, die bislang als mechanisierungsresistent gegolten hatten. Dem «menschlichen Gehirn» verbleibe, wie Bittorf tröstend schrieb, nur eine kleine, dafür aber umso anspruchsvollere Aufgabe: «Entscheidungen zu fällen und Massstäbe zu setzen».³⁷

Was die Autoren der Automatisierungsdebatte – Wissenschaftler, Journalisten und Breitband-Referenten wie Adolf Galliker – auf diese oder ähnliche Weise beschrieben, war, wie gesagt, noch keineswegs Realität. Wirklich aber war die Maschine, die die technische Grundlage der Automation bildete. Sie galt es zu verstehen, und genau das, dieser Verstehens- und Verständigungsprozess, scheint mir die Hauptfunktion der Automatisierungsdebatte gewesen zu sein. Als die Debatte Ende der fünfziger Jahre langsam abflachte, hatte man zwar nicht unbedingt klarere Vorstellungen über die Folgen der angeblichen Automation, dafür aber ein kohärenteres und konsensualeres Bild dessen, was ein Computer ist und was er zu leisten vermag. Und das war nicht wenig.

Es gab nun offenbar Maschinen, die Dinge taten, die bislang als spezifisch menschlich galten. Maschinen, die Denkprozesse nachahmten. Die Erklärungen, die man dafür entwickelte, waren vorwiegend technisch, und daran hat sich bis heute kaum etwas geändert. Die Leistung des Computers wird gewöhnlich über *dessen* Eigenschaften erklärt³⁸ – und nicht über die Eigenschaften der Menschen, deren Verhalten er simuliert. Aber rücken Maschinen, die Denken imitieren, nicht auch dieses in ein eigentümliches Licht? Anders gefragt: Muss ein Denken, das mechanisierbar ist, nicht bereits selbst «maschinenähnliche» Züge haben? Präzise Antworten auf diese Frage wurden nicht in der Psychologie oder Soziologie formuliert, sondern in der Mathematik, und zwar nicht nach der Erfindung des Computers, sondern etliche Jahre vorher. Darauf gehe ich im folgenden näher ein.

36 Hilary PUTNAM, *Philosophy and Our Mental Life*, in: DERS., *Mind, Language and Reality*. *Philosophical Papers*, Vol. 2, Cambridge 1975, S. 291–304 (S. 291).

37 BITTORF (wie Anm. 7), S. 128. – Der Begriff des «physical symbol system» wurde von Newell und Simon in den fünfziger Jahren geprägt und gehört heute zu den Kernkonzepten der (klassischen) Künstlichen Intelligenz, vgl. Allen NEWELL und Herbert A. SIMON, *Computer Science as Empirical Enquiry: Symbols and Search*, in: John HAUGELAND (Hg.), *Mind Design*. *Philosophy, Psychology, Artificial Intelligence*, Cambridge 1981, S. 35–66.

38 Welche Eigenschaften dabei in den Mittelpunkt gerückt werden, ist abhängig von der Betrachtungsebene, die man wählt, d.h. von der «Schicht» des Computersystems, auf die man Bezug nimmt, vgl. zu diesem Schichtenmodell der Informatik Wolfgang K. GILOI, *Rechnerarchitektur*, Berlin, Heidelberg, New York 1981, S. 11ff. Diesen Betrachtungsebenen bzw. Schichten lassen sich verschiedene Erklärungstypen zuordnen; vgl. in diesem Zusammenhang Daniel C. DENNETT, *Intentional Systems*, in: DERS., *Brainstorms*, Cambridge 1981, S. 3–23, der zwischen einer «physikalischen», einer «funktionalen» und einer «intentionalen» Erklärung unterscheidet.

II

1936/37 veröffentlichte der englische Mathematiker Alan Turing einen Aufsatz mit dem Titel *On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungsproblem*.³⁹ Als «Entscheidungsproblem» wurde die Frage bezeichnet, ob es ein effektives Verfahren, einen Algorithmus gibt, mit dem man für jede Formel der elementaren Prädikatenlogik entscheiden kann, ob sie gültig ist oder nicht.⁴⁰ Die klassische Formulierung stammt von David Hilbert: «Das Entscheidungsproblem ist gelöst, wenn man ein Verfahren kennt, das bei einem vorgelegten logischen Ausdruck durch endlich viele Operationen die Entscheidung über die Allgemeingültigkeit bzw. Erfüllbarkeit erlaubt».⁴¹ Nicht-Mathematikern mag dieses Problem einigermaßen abstrakt und nicht weiter bedeutsam vorkommen. Für die Mathematiker selbst war es aber durchaus zentral. Denn existierte ein solches Verfahren, dann wäre, wie viele damals befürchteten, das Betreiben von Mathematik nur noch ein rein mechanischer Prozess, für alle zugänglich, sogar, wie Turing später bewies, für eine Maschine. Die Unent-

39 Alan TURING, *On Computable Numbers, With an Application to the Entscheidungsproblem*, in: *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42, 2, 1936/37, wieder abgedruckt in: Martin DAVIS (Hg.), *The Undecidable: Basic Papers on Undecidable Propositions, Unsolvability Problems and Computable Functions*, New York 1967, S. 116–151. In den letzten Jahren ist Turing (1912–1954) zu einer Kultfigur avanciert, zumal in jenen schönggeistigen Zirkeln, in denen technisches Nicht-Wissen noch immer für kulturelles «standing» bürgt. Sein Leben verleiht dem profanen Interesse am Computer die gebotene intellektuelle Weihe: Turing war Mathematiker und reichlich exzentrisch, er war homosexuell und angestellt vom Britischen Geheimdienst, für den er die deutsche ENIGMA knackte, er war Computererfinder und Marathonläufer und starb schliesslich einen mysteriösen Schneewittchentod – «jedenfalls will das Gericht nicht verstummen, man könne ihn, oder sein Simulacrum, zuweilen, an feuchten Oktobertagen besonders, in der Umgebung von Cambridge, auf abgemähten Stoppelfeldern, unberechenbar Haken schlagend, im Nebel querfeldein laufen sehen» (Hans Magnus Enzensberger, *Mausoleum*, 1975). Für weitere Informationen vgl. die ausgezeichnete Biographie von Andrew HODGES, *Alan Turing: The Enigma*, London 1983.

40 Ein Algorithmus ist ein Verfahren, das in einer *endlichen* Anzahl von *elementaren* Operationsschritten, deren Abfolge im voraus in einer *endlich* langen Beschreibung *eindeutig* festgelegt ist, die Lösung eines (mathematischen) Problems erlaubt. Oder in der knappen Formulierung von Kleene: «An algorithm is a finitely described procedure, sufficient to guide us to the answer to any one of infinitely many questions, by finitely many steps in the case of each», vgl. Stephen C. KLEENE, *Turing's Analysis of Computability, and Major Applications of It*, in: Rolf HERKEN (Hg.), *The Universal Turing Machine. A Half Century Survey*, Berlin 1988, S. 17–54 (S. 19). Diesen «intuitiven» Algorithmusbegriff hat Alan Turing in seiner Arbeit mathematisch präzisiert. Für den mathematischen und ideengeschichtlichen Hintergrund stütze ich mich im weiteren auf folgende Darstellungen, in denen sich auch eine Reihe von Differenzierungen finden, die ich hier unterschlagen muss: Heinz BACHMANN, *Der Weg der mathematischen Grundlagenforschung*, Bern 1983; Martin DAVIS, *Mathematical Logic and the Origin of Modern Computing*, in: HERKEN (wie oben), S. 149–174; Robin GANDY, *The Confluence of Ideas in 1936*, in: HERKEN (wie Anm. oben), S. 55–111; KRÄMER (wie Anm. 3); R.J. NELSON, *Church's Thesis and Cognitive Science*, in: *Notre Dame Journal of Formal Logic*, 1987, 28, 4, S. 581–614; WEBB (wie Anm. 5).

41 Zit. in GANDY (wie Anm. 40), S. 62. Der deutsche Mathematiker David Hilbert (1862–1943) war der Begründer des sogenannten formalistischen Programms, mit dem er die Widerspruchsfreiheit der Mathematik zu beweisen versuchte. Auf den Hilbertschen Formalismus und seinen Zusammenhang zur Mechanisierungsdiskussion in der Mathematik kann ich hier nicht näher eingehen, vgl. dazu KRÄMER (wie Anm. 3), S. 139ff., und WEBB (wie Anm. 5), insbes. S. 132ff. und Kap. IV. Hilberts Programm erwies sich letztlich als undurchführbar (vgl. dazu auch Anm. 44).

scheidbarkeit sei sogar «die *conditio sine qua non* dafür», schrieb John von Neumann 1927, «dass es überhaupt einen Sinn habe, mit den heutigen heuristischen Methoden Mathematik zu treiben. An dem Tage, an dem die Unentscheidbarkeit aufhörte, würde auch die Mathematik im heutigen Sinne aufhören zu existieren; an ihre Stelle würde eine absolut mechanische Vorschrift treten, mit deren Hilfe jedermann von jeder gegebenen Aussage entscheiden könnte, ob diese bewiesen werden kann oder nicht». Ähnlich argumentierte auch der englische Mathematiker G. H. Hardy: «Suppose, for example, that we could find a finite system of rules which enabled us to say whether any given formula was demonstrable or not. This system would embody a theorem of metamathematics. There is of course no such theorem and this is very fortunate, since if there were we should have a mechanical set of rules for the solution of all mathematical problems, and our activities as mathematicians would come to an end.»⁴²

Das Problem, mit dem sich Turing 1936 beschäftigte, wurde also (wie das Hilbertsche Formalisierungsprogramm überhaupt) in Verbindung gebracht mit etwas «Mechanischem». Von Neumann bezeichnete ein solches Entscheidungsverfahren als «mechanische Vorschrift», G. H. Hardy sprach von einem «mechanical set of rules», und M. H. A. Newman, der Lehrer von Turing (Turing war damals 24 Jahre alt), verglich es mit einem «mechanischen Prozess».⁴³ Turing bewies nun, dass es ein solches Entscheidungsverfahren nicht geben kann (und ergänzte damit die Liste der sogenannten «limitativen» Theoreme).⁴⁴ Dazu entwickelte er eine formale Definition des bislang bloss intuitiv verwendeten Algorithmusbegriffs, und zwar über das Modell einer (symbolischen) Maschine, die heute als «Turingmaschine» bezeichnet wird. Turing war damals nicht der einzige, der sich mit Hilberts Entscheidungsproblem befasste. Praktisch zur gleichen Zeit, ebenfalls 1936, gelangte ein anderer Logiker, Alonzo Church, zum selben Ergebnis. Und ein dritter Mathematiker, Emil Post, formulierte zwar keinen Beweis (der Churchsche Unentscheidbarkeitssatz war ihm bereits bekannt), aber er entwickelte eine weitere Präzisierung des Algorithmusbegriffs, und dies mit Hilfe einer Konstruktion, die praktisch identisch mit jener von Turing war. Im gleichen Jahr erschienen also drei Arbeiten zum selben Thema, zwei davon mit einer praktisch identischen Argumentation. In beide fließen, wie ich im dritten Teil zu zeigen versuche, Denkmodelle ein, die ausserhalb der Mathematik entwickelt worden waren. Dies mag als Exempel dafür dienen, dass auch mathematische Theoreme

42 Beide Stellen zit. in GANDY (wie Anm. 40), S. 66f.

43 Vgl. HODGES (wie Anm. 39), S. 93.

44 Die beiden andern limitativen Theoreme sind die beiden Unvollständigkeitssätze von Kurt Gödel (1931). Gödel bewies, einfach ausgedrückt, dass es (1) in jedem widerspruchsfreien formalen System *T* wahre, aber in *T* nicht ableitbare Sätze gibt, und (2) dass die Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems *T* nicht mit den in *T* selbst formalisierten Mitteln bewiesen werden kann. Dazu braucht es ein «stärkeres» System *T*, dessen Widerspruchsfreiheit sich jedoch gleichermassen nicht immanent beweisen lässt. Das dritte limitative Theorem ist der erwähnte Unentscheidbarkeitssatz, der zur gleichen Zeit (1936) von Alonzo Church und Alan Turing – wenn auch mit unterschiedlichen Mitteln – bewiesen wurde. «Limitativ» werden die drei Theoreme genannt, weil sie die Undurchführbarkeit des formalistischen Programms bewiesen, und zwar mit formalen Mitteln. Aus der Tatsache, dass die Grenzen des formalistischen Programms *formal* bewiesen wurden, ergibt sich eine hübsche Pointe für die Frage nach der Mechanisierbarkeit der Mathematik, vgl. dazu die Argumentation von WEBB (wie Anm. 5).

Konstrukte sind und Mathematiker von ihrem kulturellen Kontext ebenso beeinflusst sind wie jene Wissenschaftshistoriker, die ihnen das zu beweisen suchen.

Die Frage nach der Entscheidbarkeit formaler Ausdrücke ist aus Gründen, auf die ich hier nicht näher eingehen kann, äquivalent der Frage nach der Berechenbarkeit von Funktionen. Eine negative Antwort auf das Entscheidungsproblem, und dass sie negativ ausfallen würde, nahm Turing an, würde folglich den Nachweis bedingen, dass es nicht-berechenbare Funktionen bzw. nicht-entscheidbare Fragen gibt, Probleme mit andern Worten, für die kein Algorithmus existiert. Ein solcher Nachweis erforderte jedoch, und darin lag das Problem, eine mathematische Präzisierung des Begriffs der Berechenbarkeit, den man bislang bloss intuitiv verwendet hatte. Oder wie Stephen C. Kleene schreibt, ein Logiker, der zu dieser «confluence of ideas» in den dreissiger Jahren selbst massgeblich beigetragen hatte: «Only in the present century did people begin to think intensively about exactly what an algorithm is, or about what decidability and computability really mean. The idea of an algorithm, or of a decision or computation procedure, is sufficiently real so that in two thousand years of examples mathematicians had no trouble in agreeing in each particular case of an infinite class of questions with a procedure they had in hand that the procedure is an algorithm for the class of questions or is not. But this history – these examples – do not provide a concrete picture of what the *totality* of all possible algorithms look like. Without such a picture there is no possibility of showing that for some infinite class of questions an algorithm does not exist.»⁴⁵

Um ein solches Bild bemühten sich in den dreissiger Jahren verschiedene Mathematiker. Jacques Herbrand und Kurt Gödel führten die allgemein-rekursiven Funktionen ein, Alan Turing sein Maschinenmodell, Alonzo Church und Stephen Kleene entwickelten das Konzept der λ -Definierbarkeit, und Church zeigte anschliessend, dass all diese Präzisierungen des Berechenbarkeitsbegriffs mathematisch äquivalent sind. Das war der Beginn der sogenannten Berechenbarkeitstheorie, die heute in der theoretischen Informatik eine zentrale Rolle spielt. Die Lösungswege, die dabei eingeschlagen wurden, unterschieden sich jedoch. Während man mit dem Begriff der allgemein-rekursiven Funktion zu einer exakten Charakterisierung der Klasse der berechenbaren Funktionen gelangte, gingen Turing (und auch Post) von der Frage aus, was Berechnung überhaupt heisst. Die eigentliche Frage lautet, so Turing in seinem Artikel: «What are the possible *processes* which can be carried out in computing a number?»⁴⁶

Berechenbare Funktionen sind Funktionen, für die ein Algorithmus existiert. Aber was ist ein Algorithmus? Ein Algorithmus ist, intuitiv formuliert, eine genau spezifizierte Vorschrift, die mechanisch, ohne zu denken, ausgeführt werden kann, von jedermann und jederfrau.⁴⁷ Turing, und das war das Ungewöhnliche an seiner Argumentation, benützte das Wort «mechanisch» nicht metaphorisch, sondern nahm es wörtlich: Ein mechanischer Prozess ist ein Prozess, der durch eine *Maschine* ausgeführt werden kann. Aber durch was für eine Maschine? Wie ist ihr Funktionsprinzip? Durch eine Maschine, so Turings Antwort, die im Prinzip ähnlich funktioniert wie

45 KLEENE (wie Anm. 40), S. 20.

46 TURING (wie Anm. 39), S. 135. Hervorhebung B. H.

47 Vgl. Anm. 40.

ein Mensch, der eine Berechnung ausführt. Turing entwarf also, und das ist ein entscheidender Punkt, zunächst einmal ein (allerdings sehr idealisiertes) Modell des menschlichen Rechenprozesses und zeigte dann anschliessend, dass man sich eine Maschine vorstellen kann, die im Prinzip genau gleich vorgeht. Damit war eine Verbindung geschlagen zwischen dem Menschen, der wie eine Maschine funktioniert, und der Maschine, die zu menschlichen Leistungen fähig ist. Und das ist eine Verbindung, die noch heute, und immer stärker, unser Denken prägt.⁴⁸

Was tut ein Mensch, der eine Berechnung ausführt, z.B. multipliziert? Dies kann man sich, so Turing, folgendermassen vorstellen. Normalerweise rechnet man, indem man Symbole auf ein Blatt Papier schreibt, zunächst die Aufgabe, dann die Zwischenergebnisse und schliesslich das Resultat. Idealisiert kann man sich dieses Blatt Papier als ein Band vorstellen, das in Felder unterteilt ist. Jedes Feld enthält Symbole, Einfachheit halber nur eines. Der Rechenprozess selbst ist ein rein mechanischer Prozess, den ich blind, ohne zu überlegen, ausführen kann. Denn wie man vorgeht bei einer Multiplikation, das habe ich vor Jahren in der Schule gelernt und tausendfach eingeübt. Ich verfüge m.a.W. über einen Algorithmus zur Multiplikation von Zahlen. Die Ausführung dieses Rechenprozesses kann man sich nun als schrittweise Transformation der Symbole auf dem Band vorstellen. Ich beginne bei dem ersten Symbol links, verändere es oder lasse es stehen, schaue danach auf das nächste Symbol ein Feld weiter rechts, verändere es oder lasse es stehen, usw., bis die Multiplikation ausgeführt ist. Zum Schluss steht eine andere Symbolfolge auf dem Band, und diese Abfolge repräsentiert das Resultat. Turing stellte sich also den menschlichen Rechenprozess als eine determinierte Sequenz von einzelnen, ganz elementaren Operationen vor: Wahrnehmen des Symbols; Überschreiben oder Löschen; Bewegung nach rechts; Bewegung nach links; stoppen. Welche Operation dabei ausgeführt wird, ob ein Symbol gelöscht wird oder überschrieben, ob sich die Augen nach rechts bewegen oder nach links, das ist, so Turing, von zwei Dingen abhängig: erstens vom jeweiligen mentalen Zustand des menschlichen Rechners, seinem «state of mind», und zweitens von dem Symbol, das er gerade wahrgenommen, «eingelesen» hat, wie man heute sagen würde.

Die ganze «Prozedur» ist also ein vollkommen determinierter Prozess, der sich aus einfachsten Handlungselementen zusammensetzt. In den Worten von Turing: «The behaviour of the computer (damit ist, wie gesagt, der Mensch gemeint, B. H.) at any moment ist determined by the symbols which he is observing, and his 'state of mind' at that moment. (...) Let us imagine the operations performed by the computer to split up into 'simple operations' which are so elementary that it is not easy to imagine them further divided. Every such operation consists of some change of the physical system consisting of the computer and his tape. (...) We may suppose that in a simple operation not more than one symbol is altered. Any other changes can be split

48 Turings Arbeit wird, je nach Standort, mit unterschiedlichen Akzentsetzungen gelesen. Die einen rücken sein Maschinenmodell in den Vordergrund und interpretieren die Turingmaschine (zu Unrecht allerdings) als eine Art Computerarchitektur. Andere, dazu gehört vor allem die theoretische Informatik, beziehen sich vorwiegend auf Turings Präzisierung des Berechenbarkeitsbegriffs, und dritte schliesslich stellen so wie ich seine Modellierung des menschlichen Rechenprozesses, d.h. sein kognitiv-psychologisches Modell in den Mittelpunkt ihrer Argumentation.

up into simple changes of this kind.» Und dann schliesst er diese Ausführungen mit dem reichlich lapidaren Satz: «We may now construct a machine to do the work of this computer.»⁴⁹

Diese Maschine, die sogenannte Turingmaschine, funktioniert im Prinzip genau gleich wie sein menschlicher «computer». Eine Turingmaschine besteht aus zwei Teilen: aus einem Lese- bzw. Schreibkopf und aus einem Band, das unendlich lange und in Felder aufgeteilt ist. Auf jedem Feld kann ein Symbol stehen, im einfachsten Fall ein Strich oder eine Null bzw. nichts, ein Blank. Diese Symbole bilden den Zeichenvorrat, das (endliche) Alphabet der Maschine. Wie Turings menschlicher «computer» kann sich die Maschine auf dem Band hin und her bewegen, nach rechts oder nach links, aber immer nur auf einem Feld pro Schritt, und ebenso wie er kann sie verschiedene (aber nur endlich viele) Zustände einnehmen. Je nachdem in welchem Zustand sie sich befindet, verhält sie sich in derselben Situation anders. Wenn sie z.B. auf einen Strich stösst und im Zustand y_1 ist, löscht sie ihn, wechselt in den Zustand y_2 und rückt nach rechts. Wenn sie sich im Zustand y_2 befindet, lässt sie den Strich stehen, behält den Zustand bei und rückt nach links. Wenn man die Turingmaschine einmal in Gang gesetzt hat, dann geht sie automatisch vor, Schritt für Schritt. Sie bewegt sich nach rechts oder nach links auf dem Band, löscht ein Symbol oder überschreibt es und wechselt je nachdem ihren Zustand. Was sie bei jedem Schritt tut, ist vollkommen determiniert durch den Zustand, in dem sie sich gerade befindet, und das Symbol, das sie eingelesen hat. Auch darin unterscheidet sie sich nicht von Turings menschlichem «computer».⁵⁰

Abstrakt gesehen folgt eine Turingmaschine bestimmten Regeln, die sich in einer sogenannten *Maschinentafel* zusammenfassen lassen. In der Horizontalen sind die möglichen Symbole (x_1, \dots, x_m) notiert, in der Vertikalen die Zustände, die die Maschine einnehmen kann (y_1, \dots, y_n), und in den Feldern, die sich daraus ergeben, ist eingetragen, welche Operation die Maschine ausführt, wenn sie sich im Zustand y_k befindet und auf das Symbol x_i stösst – ob sie stehenbleibt oder sich nach links bewegt oder nach rechts, ob sie ein Symbol überschreibt oder es löscht und ob sie ihren Zustand beibehält oder ihn ändert. Jede Turingmaschine wird durch ihre Maschinentafel vollständig repräsentiert. Die «Apparatur» selbst ist nicht von Belang. Was Turing als «Maschine» bezeichnet, hat also nichts zu tun mit einer Maschine im tech-

49 TURING (wie Anm. 39), S. 136f.

50 Diese Determiniertheit, und damit auch: Vorhersagbarkeit, gilt nur für die einzelnen Operationen, nicht aber für das Gesamtverhalten. Denn der Unentscheidbarkeitsbeweis von Turing bestand gerade darin zu zeigen, dass das Gesamtverhalten der Maschine unter bestimmten Bedingungen nicht vorhersagbar ist – so wenig vorhersagbar wie das menschliche Verhalten. Damit hat Turing ein Problem gelöst, das die klassische mechanistische Theorie des Geistes noch in beträchtliche Argumentationsnot gebracht hatte: Wie konnte der Mensch, undurchschaubar wie er war, gleichzeitig als Maschine betrachtet werden, dem Inbegriff von Regelmässigkeit und Vorhersagbarkeit? Indem Turings Maschine eine Abkehr erzwingt vom klassischen Maschinenbegriff, hat sie der mechanistischen Theorie neue Bedeutung und neuen Auftrieb verschafft, vgl. zu diesem Bedeutungswandel des Mechanismus WEBB (wie Anm. 5).

nischen Wortsinn. Eine Turingmaschine ist, um auf den Begriff von Sybille Krämer zurückzukommen (vgl. S. 118), eine *symbolische* Maschine.⁵¹

Was tut also eine Turingmaschine? Sie transformiert Symbole nach klar bestimmten Regeln, Schritt für Schritt, genauso wie das Turing's menschlicher «computer» tut, und indem sie das tut, arbeitet sie den Algorithmus ab, der durch die Maschinentafel dargestellt wird. Die Objekte der algorithmischen Operation sind nicht Zahlen, sondern Symbole (die natürlich auch für Zahlen stehen können). Eine Turingmaschine ist keine Rechenmaschine (im engen Sinn), sondern, wie bereits angemerkt, eine Maschine zur Symboltransformation, und das gleiche gilt auch für den menschlichen «Rechenprozess», aus dessen Analyse Turing sein Maschinenkonzept entwickelte. Rechnen meint nicht ein konkretes Hantieren mit Zahlen, sondern ein regelgeleitetes Operieren mit Zeichen. Beschreibt man kognitive Prozesse als formale Transformation von Symbolen, wie es die mechanistische Theorie des Geistes tut, so wird der Unterschied zwischen «Rechnen» und «Denken» hinfällig: «cognition is computation», wie das Diktum der «cognitive science» lautet.⁵² Für diese Gleichsetzung zahlt man freilich seinen Preis: Bedeutung, Sinn und Intuition bleiben dabei auf der Strecke. Der Mensch der «cognitive science» ist ein Schrumpffexemplar seiner Gattung – ein körperloses Wesen, das in seinem Kopf mechanisch Algorithmen abspult.

«A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine» – eine *Papiermaschine*, wie Turing den Menschen bisweilen auch zu nennen pflegt.⁵³ Dieser Ausdruck verweist auf eine zweite Modellierung des «Rechenprozesses» – auf eine «Software»-Variante, wie man heute sagen würde. Was der «computer» tut, ob er nun menschlich ist oder maschinell, ist abhängig von dem, was er gerade wahrnimmt, und von seinem «state of mind». Nun

51 «Symbolisch» meint hier, so Sybille Krämer, zweierlei: «Einmal: diese Maschine gibt es nicht wirklich, sondern nur symbolisch. Sie ist kein Apparat bestimmter physikalischer, z.B. mechanischer oder elektronischer Wirkungsweise, der eine bestimmte Stelle in Raum und Zeit einnimmt, sondern diese Maschine existiert nur auf dem Papier. Zum andern: diese Maschine macht nichts anderes, als Symbolreihen zu transformieren. Ihre Zustände sind vollständig beschreibbar durch eine Folge von Symbolkonfigurationen, vermittels deren eine gewisse Anfangskonfiguration in eine gesuchte Endkonfiguration von Symbolen überführt wird», KRÄMER (wie Anm. 3), S. 2f. zum allgemeinen Begriff der «symbolischen Maschine» und S. 169ff. speziell zum Turingmodell.

52 Kurz gefasst beruht die «cognitive science» auf vier Annahmen, die sich letztlich alle auf Turings Argumentation zurückführen lassen: (1) – und gegen den Behaviorismus gerichtet – es gibt eine eigenständige kognitive Ebene, die kausal wirksam ist; (2) der Computer ist das beste Modell, das wir haben, um psychische Vorgänge zu verstehen; (3) Denken lässt sich als formale Symboltransformation beschreiben, und damit (und nur damit) hat sich die Psychologie zu beschäftigen; und (4) alles präzise beschreibbare menschliche Verhalten ist auf einem Computer simulierbar. Vgl. dazu exemplarisch Jerry FODOR, Methodological Solipsism Considered as Research Strategy in Cognitive Psychology, in: HAUGELAND (wie Anm. 37), S. 307–338. und Zenon W. PYLYSHYN, Computation and Cognition: Issues in the Foundation of Cognitive Science, in: The Behavioral and Brain Sciences, 1980, 3, S. 111–169. Zu einer historischen Rekonstruktion der Vorstellung, dass sich Rechnen und Denken gleichermaßen als formale Operation über bedeutungsfreien Symbolen beschreiben lassen, vgl. KRÄMER (wie Anm. 3).

53 Alan TURING, Intelligent Machinery, 1948, erstmals publiziert in: Bernhard MELTZER und Donald MICHIE (Hg.), Machine Intelligence, Vol. V., New York 1970, S. 3–23 (S. 9); TURING, On Computable Numbers (wie Anm. 39), S. 139. Auf das an sich zentrale Konzept der universellen Turingmaschine kann ich hier nicht näher eingehen.

kann man sich aber, so Turing, auch folgendes vorstellen: «It is always possible for the computer to break off from his work, to go away and forget all about it, and later to come back and go on with it. If he does this he must leave a note of instructions (written in some standard form) explaining how the work is to be continued. This note is the counterpart of the 'state of mind'. We will suppose that the computer works in such desultory manner that he never does more than one step at a sitting. The note of instructions must enable him to carry out one step and write the next note. Thus the state of progress of computation at any stage is completely determined by the note of instructions and the symbols of the tape.»⁵⁴ Bei dieser Variante sind die Anweisungen nicht gespeichert, nicht fixiert in neuronalen oder elektronischen Strukturen, sondern schriftlich formuliert und von ihrem jeweiligen Träger abgelöst. Beide Modellierungen sind jedoch funktional äquivalent, und sie sind auch komplementär. Was als Hardware realisiert ist, kann (bis zu einer gewissen Grenze) auch programmiert werden und umgekehrt. Das war auch, um kurz von der symbolischen Maschine zu ihrer irdischen Variante überzuwechseln, die Überlegung, die Turing bei der Entwicklung seiner eigenen Maschine, der *Automatic Computing Engine* (ACE) leitete. Anstatt sich auf die Hardware-Ausstattung zu konzentrieren, verlegte er das Gewicht auf die Programmebene. «We are trying to make greater use of facilities available in the machine to do all kinds of different things simply by programming rather than by the addition of extra apparatus», führte er in einem Vortrag in Harvard aus, in durchaus gewollter Abgrenzung zur «American tradition of solving one's difficulties by means of much equipment rather than by thought», wie er mit Blick auf den ENIAC und von Neumanns IAS-Computer reichlich suffizient bemerkte.⁵⁵

Digitalcomputer sind, vereinfacht ausgedrückt, physikalische Realisierungen von Turingmaschinen.⁵⁶ Deshalb liest sich Turings Argumentation heute so: Es können Maschinen konstruiert bzw. programmiert werden, die im Prinzip genau gleich vorgehen wie ein Mensch und zu denselben Leistungen fähig sind wie er. Um die Möglichkeiten (und Grenzen) von Digitalcomputern abzuschätzen, brauchte Turing seine am mathematischen Modell gewonnenen Überlegungen bloss auf die neuen Maschinen zu übertragen. «The idea behind digital computers may be explained by saying that these machines are intended to carry out operations which could be done by a human computer. The human computer is supposed to be following fixed rules; he has no authority to deviate from them in any detail. We may suppose that these rules are supplied in a book, which is altered whenever he is put on to a new job. (...) The book of rules which we have described our human computer as using is of course a convenient fiction. Actual human computers really remember what they have got to do. If one

54 TURING, *On Computable Numbers* (wie Anm. 39), S. 139.

55 Vortrag auf dem Harvard Symposium on Large Scale Digital Calculating Machinery, 1948, zit. in HODGES (wie Anm. 39), S. 352 und 354. Genau darin bestand auch ein wesentlicher Unterschied zwischen Turings Computerplänen und der IAS-Konzeption, die sich zu dieser Zeit als verbindliches und handlungsleitendes Modell durchzusetzen begann (vgl. Teil I). Vgl. dazu auch die nachgelassenen Schriften von Turing zu seinem ACE-Projekt, die vor kurzem von R.E. CARPENTER und R.W. DORAN (Hg.), *A.M. Turing's ACE Report of 1946 and Other Papers*, Cambridge 1986, zum ersten Mal veröffentlicht wurden.

56 Es bleiben freilich einige Differenzen. Insbesondere ist das Gedächtnis der irdischen Computer endlich, im Gegensatz zum unendlichen Band der Turingmaschine.

wants to make a machine mimic the behavior of the human computer in some complex operation one has to ask him how it is done, and then translate the answer into the form of an instruction table. Constructing instruction tables is usually described as 'programming'.»⁵⁷

Was Turing hier so locker hinschreibt – «one has to ask him how it is done» – ist freilich auch bloss eine «zweckdienliche Fiktion». Denn Simulation setzt voraus, dass die Menschen, die simuliert werden, genau wissen, was sie tun (und wie sie es tun). Ihr Vorgehen muss ihnen (1) *bewusst* sein; sie müssen es (2) auch *beschreiben* können und wollen; und (3) muss der Programmierer (bzw. der Wissensingenieur) ihre Aussage so *verstehen*, wie sie sie tatsächlich gemeint haben.⁵⁸

Zusammenfassend lässt sich Turings Argumentation in vier Punkten formulieren: (1) Wenn Menschen denken, folgen sie gewöhnlich klaren Regeln, und Denken selbst lässt sich beschreiben als ein formaler Prozess, der von der Bedeutung der gedanklichen Objekte abstrahiert. «Vernunft ist Rechnen, das heisst Addieren und Subtrahieren, mit den Folgen aus den allgemeinen Namen, auf die man sich zum *Kennzeichnen* und *Anzeigen* unserer Gedanken geeinigt hat»,⁵⁹ schrieb Thomas Hobbes in seinem *Leviathan* und formulierte damit den Grundgedanken eines mechanistischen Modells, das im Gegensatz zur Variante, wie sie etwa Julien Offray de La Mettrie vertrat, den menschlichen Geist als *logische* Maschine konzipierte.⁶⁰ Was Hobbes in seiner nominalistischen Erkenntnistheorie vertrat (und Leibniz mit seiner Idee einer «*characteristica universalis*» systematisierte), hat Alan Turing aufgenommen und weiter ausgebaut.

(2) Wenn ein Mensch über eine solche Regel, einen Algorithmus verfügt, dann geht er im Prinzip ganz mechanisch vor, Schritt für Schritt, wie oben beschrieben. Was als komplexer Prozess erscheinen mag, lässt sich aufspalten in einfachste Handlungselemente. Denken ist ein mechanischer Prozess, eine schrittweise Abfolge von elementaren Operationen, und der Mensch, der denkt, funktioniert wie eine Turingmaschine (bzw. wie ein Computer).

(3) Es lassen sich Maschinen konzipieren, die genau gleich vorgehen wie ein Mensch. Folglich lässt sich

(4) alles, wofür es eine klare Methode, klare Regeln gibt, von einer Turingmaschine ausführen. Oder in der etwas restriktiveren Fassung von Judson C. Webb: «Every humanly effective computation procedure can be simulated by a Turing

57 Alan TURING, *Computing Machinery and Intelligence*, in: *Mind*, 59, 236, 1950, S. 433–460 (S. 437f.).

58 Aus kommunikationstheoretischer Sicht sind alle drei Annahmen ausserordentlich problematisch, wie auch die Kritiker der Künstlichen Intelligenz immer wieder betonen. Ich kann auf diese philosophische KI-Diskussion nicht näher eingehen, werde aber im vierten Teil kurz auf eine soziologische Dimension des KI-Projekts zu sprechen kommen.

59 Thomas HOBBS, *Leviathan*, Frankfurt/Main 1984, S. 32. Unterstreichung vom Autor.

60 Vgl. dazu u.a. WEBB (wie Anm. 5), insbes. S. 18ff. Im Gegensatz zu vielen andern sieht Webb in La Mettrie nicht einen (vulgären) Materialisten, der aus dem Menschen, um Marvin Minsky zu zitieren, eine blosser «Fleischmaschine» macht, sondern interpretiert seine Position als eine Art emergenztheoretische, wie sie heute vor allem John R. Searle vertritt. Zu La Mettrie und dem klassischen Maschinenkonzept vgl. auch Alex SUTTER, *Göttliche Maschinen*, Frankfurt/Main 1988, insbes. Kap. 4, S. 133ff.

machine.»⁶¹ Das ist die sogenannte Turingthese, die in der theoretischen Informatik eine wesentliche Rolle spielt und in einer etwas erweiterten Form als Prämisse der Künstlichen Intelligenz zugrunde liegt. In dieser weiteren Fassung behauptet sie, dass menschliches Denken auf einem Computer simulierbar ist. In der Formulierung von Webb: «Every 'precisely described' human behavior can be simulated by a suitably programmed computer».⁶² Diese Behauptung setzt allerdings voraus, das sei hier noch einmal betont, dass Denken tatsächlich klaren Regeln folgt und diese Regeln auch bewusst, beschreibbar und verstehbar sind.

III

Zur selben Zeit, als Turing seinen Artikel schrieb, beschäftigte sich ein anderer Mathematiker, Emil Post, mit dem gleichen Problem: Wie lässt sich der Algorithmusbegriff mathematisch präzisieren? Turing und Post wussten nichts voneinander, und dennoch kamen beide auf genau dieselbe Idee. Mit einem kleinen Unterschied allerdings. Beide verbanden «Algorithmus» mit etwas «Mechanischem», nur dachte Turing dabei an Maschinen, Emil Post dagegen an Fließbandarbeiter. Beides erwies sich jedoch als äquivalent. Post entwarf bis ins kleinste Detail hinein genau dasselbe Modell wie Turing, nur war der Ausführende bei ihm nicht eine Maschine, sondern ein «Arbeiter», der völlig mechanisch seinen Instruktionen folgt. Der Postsche Arbeiter bewegt sich in einem «symbol space», und dieser «symbol space», wie Post ihn nennt, besteht wie bei Turing aus einer unendlichen Folge von Feldern, die entweder leer sind oder eine Markierung enthalten.⁶³ Der Arbeiter führt nun in (bzw. auf) diesem «symbol space» folgende Operationen aus.

- «(a) Marking the box he is in (assumed empty),
- (b) Erasing the mark in the box he is in (assumed marked),
- (c) Moving to the box on his right,
- (d) Moving to the box on his left,
- (e) Determining whether the box he is in, is or is not marked.»

61 WEBB (wie Anm. 5), S. 220. Und in der ganz engen Fassung: «Every number-theoretic function for which there is an algorithm – which is intuitively computable – (...) is Turing computable; that is, there is a Turing machine which computes it», vgl. KLEENE (wie Anm. 40), S. 29. In dieser engen Fassung wird die Turing-These auch als Church-Turing-These bezeichnet. Church hatte im selben Jahr wie Turing seinerseits eine Präzisierung des Begriffs der Berechenbarkeit vorgeschlagen (vgl. S. 130f.). Diese Präzisierung, es handelt sich genau genommen um eine Definition, wurde später als Church-These bezeichnet. Sie erwies sich als äquivalent mit Turings (und Gödels) Berechenbarkeitsbegriffen, vgl. dazu u.a. GANDY (wie Anm. 40), insbes. S. 75–88, und Salomon FEFERMAN, Turing in the Land of $O(z)$, in: HERKEN (wie Anm. 40), insbes. S. 115–118.

62 WEBB (wie Anm. 5), S. 220.

63 Wörtlich: «The symbol space is to consist of a two way infinite sequence of spaces or boxes. (...) The problem solver or worker is to move and work in this symbol space, being capable of being in, and operating in but one box at time. And apart from the presence of the worker, a box is to admit of but two possible conditions, i.e., being empty or unmarked, and having a single mark in it, say a vertical stroke», Emil POST, Finite Combinatory Processes. Formulation I, in: DAVIS (wie Anm. 39), S. 289–291 (S. 289).

Was er bei jedem Schritt tut, ist bestimmt durch ein «set of directions», durch eine Menge von Anweisungen, «which will both direct operations in the symbol space and determine the order in which those directions are applied». Der Postsche Arbeiter macht also genau dasselbe wie Turings Maschinenkopf. Er bewegt sich nach rechts oder nach links. Überschreibt ein Symbol oder löscht es. Und dies alles tut er wie eine Maschine, völlig mechanisch. Er führt blind, ohne zu denken, Instruktionen aus. Beide Präzisierungen des Algorithmusbegriffs sind mathematisch gesehen äquivalent.⁶⁴ Der «Postsche Arbeiter» lässt sich durch eine Turingmaschine ersetzen und die Turingmaschine durch den Postschen Arbeiter.

Diese Parallelen sind aus verschiedenen Gründen erstaunlich. Die Mathematik scheint auf einmal durchlässig geworden zu sein für Denkmodelle, die ausserhalb von ihr entwickelt worden waren. In einer mathematischen Arbeit tauchen plötzlich «Arbeiter» auf und «Maschinen», Begriffe, die in der Mathematik nicht unbedingt verbreitet sind. Nicht minder erstaunlich ist ihre Beschreibung. Das Design ist in beiden Fällen dasselbe: ein unendliches Band, eine Unterteilung in Felder, einfachste Handlungen, mechanisches Ausführen von Befehlen, schrittweises Vorgehen und sequentielle Anordnung. Die Grundidee bleibt sich gleich: Komplexe Prozesse lassen sich aufspalten in einfachste Operationen, die hintereinandergeschachtelt wieder ein Ganzes ergeben. Einmal führt eine Maschine die Anweisungen aus, das andere Mal ein Arbeiter. Beide funktionieren im Prinzip genau gleich. Sie sind austauschbar. Was man mechanisch tut, kann auch durch eine Maschine ausgeführt werden, schrieb Turing und zeigte damit, dass ein Mensch, der Schritt für Schritt klaren Anweisungen folgt, durch eine Maschine ersetzbar ist. Dies konnte man zu dieser Zeit auch ausserhalb der Mathematik lernen, und ich denke, genau das haben Turing (und Post) getan. Darauf möchte ich im folgenden kurz eingehen.⁶⁵

In den zwanziger Jahren entstand in praktisch allen europäischen Ländern eine Bewegung, die sich an Amerika orientierte und die dort entwickelten Prinzipien «wissenschaftlicher Arbeitsorganisation» als Lösung der wirtschaftlichen und sozialen Probleme propagierte.⁶⁶ «Rationalisierung» wurde zu einem Schlüsselbegriff im Rahmen der wirtschaftspolitischen Diskussion und bezeichnete ein breites Spektrum von Massnahmen, die von technischen Innovationen über sozialorganisatorische Eingriffe

64 Was noch einmal deutlich macht, dass die «Maschinenhaftigkeit» der Turingmaschine für die Argumentation nicht von Belang ist. Dasselbe hätte sich auch anhand eines (universellen) «Postschen Arbeiters» ausdrücken lassen.

65 Zu den wissenschaftsinternen Einflussfaktoren vgl. die mathematikhistorischen Darstellungen bei KRÄMER (wie Anm. 3) und WEBB (wie Anm. 5).

66 Zur «Rationalisierungsbewegung» (wie man sie bereits damals nannte) gibt es eine Vielzahl von zeitgenössischen Dokumenten. Ich beziehe mich im folgenden v.a. auf Paul DEVINAT, *Wissenschaftliche Betriebsführung in Europa*, hg. vom Internationalen Arbeitsamt, Genf 1927, und Lyndall URWICK, *Das Wesen der Rationalisierung*, Stuttgart 1930. Vor allem in der ersten Hälfte der zwanziger Jahre war «Rationalisierung» noch mit einer stark gesellschaftspolitischen Komponente konnotiert. Der Begriff umschloss, wie Charles S. MAIER, *Between Taylorism and Technocracy: European Ideologies and the Vision of Industrial Productivity in the 1920's*, in: *Journal of Contemporary History*, 1970, 5, 2, S. 27–61 ausführlich, die Vision einer von technischer Effizienz geprägten, reibungslos funktionierenden Welt. Die «amerikanischen Methoden» versprachen, ganz im Sinne ihrer Begründer Frederick W. Taylor und Henry Ford, eine technokratische Lösung der Klassenfrage, und genau das machte sie für breite Kreise attraktiv.

bis hin zu kartellähnlichen Zusammenschlüssen reichten. Unter Rationalisierung verstehe man, so die offizielle Definition der Weltwirtschaftskonferenz von 1927, «die Anwendung technischer und organisatorischer Methoden, die auf ein Mindestmass an Kraft- und Stoffverlust hinauslaufen. Rationalisierung bedeutet wissenschaftliche Organisation der Arbeit, Normung sowohl der Stoffe wie auch der Erzeugnisse, Vereinfachung der Verfahren und Verbesserungen der Transport- und Absatzmethoden». ⁶⁷ Im Bereich der sozialorganisatorischen Rationalisierung orientierte man sich vorwiegend an Frederick W. Taylors «Scientific Management», dessen Methode, wie Albert Thomas, der damalige Direktor des Internationalen Arbeitsamts schrieb, den «besten Ertrag beim Faktor Mensch» zu versprechen schien. ⁶⁸ Während die tayloristischen Prinzipien in Amerika schon längere Zeit verankert waren, wenn auch längst nicht in jenem Ausmass, wie es ihre Verfechter behaupteten, stiessen sie in Europa erst nach dem Ersten Weltkrieg auf öffentliches Interesse, nicht zuletzt auch unter dem Eindruck der Krise der frühen zwanziger Jahre. ⁶⁹ «Wissenschaftlich» an Taylors System schien vor allem die Systematik zu sein, mit der er die Arbeitsabläufe analysierte. Anstatt wie bisher «Normalzeiten» einigermaßen willkürlich festzulegen, aufgrund ungenauer und bloss zufällig erhobener Information, sollten nun exakt ermittelte Daten eine unanfechtbare Grundlage liefern. Man suche erstens, schrieb Taylor in seinen *Principles of Scientific Management*, «10–15 Leute (...), die in der speziellen Arbeit, die analysiert werden soll, besonders gewandt sind. Zweitens: Man studiere die genaue Reihenfolge der grundlegenden Operationen, welche jeder einzelne dieser Leute immer wieder ausführt, wenn er die fragliche Arbeit verrichtet (...). Drittens: Man messe mit der Stoppuhr die Zeit, welche zu jeder dieser Einzeloperationen nötig ist, und suche dann die schnellste Art und Weise herauszufinden, auf die sie sich ausführen lässt. Viertens: Man schalte alle falschen, zeitraubenden und nutzlosen Bewegungen aus. Fünftens: Nach Beseitigung aller unnötigen Bewegungen stelle man die schnellsten und besten Bewegungen (...) tabellarisch in Serien geordnet zusammen.» ⁷⁰ Diese von aller Verschwendung, von allem Bewegungsüberfluss gereinigten Handgriffe sind dann die Vorgabe, an die sich der Arbeiter zu halten hat. Zusammen mit der dazu benötigten Zeit bilden sie die Norm, von der her sich der Lohn (bzw. die Prämie) bemisst.

67 Zit. in URWICK (wie Anm. 66), S. 7.

68 Albert THOMAS, Vorwort zu DEVINAT (wie Anm. 66) S. iii.

69 Vgl. Daniel NELSON, *Managers and Workers: Origins of the New Factory System in the United States*, London 1975. Praktisch erprobt wurden sie allerdings schon vor dem Ersten Weltkrieg, vgl. für Deutschland Jürgen KOCKA, *Industrielles Management: Konzeptionen und Modelle in Deutschland vor 1914*, in: *Vierteljahresschrift für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte*, 3, 1969, S. 332–72, insbes. S. 359ff., und für England Lyndall URWICK und E.F.L. BRECH, *The Making of Scientific Management*, Vol. II: *Management in British Industry*, London 1957², insbes. Kap. VII, ohne jedoch auf breite öffentliche Resonanz zu stossen. Dies geschah erst in den zwanziger Jahren. Vgl. auch Lothar BURCHARDT, *Technischer Fortschritt und sozialer Wandel. Das Beispiel der Taylorismus-Rezeption*, in: Wilhelm TREUE (Hg.), *Deutsche Technikgeschichte*, Göttingen 1977, S. 52–98, und für die Schweiz die Studie von Rudolf JAUN, *Management und Arbeiterschaft. Verwissenschaftlichung, Amerikanisierung und Rationalisierung der Arbeitsverhältnisse in der Schweiz 1873–1959*, Zürich 1986.

70 Frederick W. TAYLOR, *Die Grundsätze wissenschaftlicher Betriebsführung*, München und Berlin 1919², S. 125f.

Taylors Bewegungsanalysen sind eine wesentliche Voraussetzung für die Fragmentierung und Mechanisierung der Arbeit. Ein komplexer Arbeitsablauf wird zergliedert in elementare Operationen und aufgeteilt auf verschiedene, dafür spezialisierte Hände, Arme oder Beine. Was sie zu tun haben, ist genau fixiert, von der Bewegung her wie von der Zeit, die dafür bemessen ist. Die fordistische Fabrikorganisation treibt dieses Prinzip dann auf die Spitze.⁷¹ Ihr Demonstrationsobjekt war eine Fabrik in Highland Park, wo Henry Ford sein berühmtes Modell T produzieren liess. Fords Grundidee war einfach und verdankt Taylors Vorüberlegungen einiges. Ein komplexes Produkt, ein Auto z.B., lässt sich Stück für Stück aus standardisierten Einzelteilen zusammensetzen, und zwar schrittweise in einer Abfolge von einfachen Arbeitsoperationen. Der Zerlegung des Produktionsprozesses in einfache Arbeitsoperationen entspricht auf der Seite der Arbeiter eine extreme Spezialisierung. Arbeit wird auf einfache Handgriffe reduziert. Das hat Vorteile, wie Ford seinen Lesern vorrechnet. Von den 7882 verschiedenen Verrichtungen, die man in seiner Fabrik zählen konnte, liessen sich «670 Arbeiten von Beinlosen, 2637 von Einbeinigen, 2 von Armlosen, 715 von Einarmigen, 10 von Blinden verrichten».⁷² Von Köpfen ist nicht die Rede. Die sind ins Planungsbüro gewandert. In der fordistischen Fabrikhalle braucht es keine mehr.

Hatte sich Taylor noch auf den einzelnen Arbeiter konzentriert, so hat Henry Ford nun den «Gesamtarbeiter» im Blick. Die Frage ist nicht mehr: Wie lässt sich ein Arbeitsgang, ein Handgriff, rationalisieren? Das ist bereits geschehen. Sondern: Wie fügt man sie zusammen zu einer möglichst reibungslos funktionierenden Maschinerie? Das Fliessband mit seinem Takt bietet dafür die Lösung. Gegenüber Taylors Methode weist die fordistische Fabrikhalle eine entscheidende Vereinfachung auf: Das Problem der Zeitkontrolle ist hier mechanisch gelöst. Was in Taylors System der «speed boss» zu tun hatte, wird nun durch das Fliessband besorgt. In der Fordschen Fabrik brauche es, wie Friedrich von Gottl-Ottlilienfeld schwärmerisch schreibt, keine Stoppuhr mehr. Denn der Arbeiter werde «vom Rhythmus des Betriebes» getragen «in Gestalt jener wundervollen Anordnung», dem Fliessband nämlich, aus dem die Arbeiter «gleich Fischern (...) ihr Werkzeug herausangeln, um es nach ihrem Handgriff wieder dem Stromlauf zu übergeben. Sie passen sich dabei in ihrem Tempo wie von selber dem geregelten Lauf des Gerinnes an».⁷³ Was bei Gottl-Ottlilienfeld zu einem pastoralen Genrebild gerät, sah in Wirklichkeit etwas prosaischer aus. Der Arbeiter muss, so ein Fabrikinspektoren-Bericht aus dem Jahr 1921/22, «auf ein Zeichen, das eine Uhr nach je 39 Sekunden gibt, das Stück an den Nachbarn zur Linken weitergeben (...), während er von dem zur Rechten ein neues zugeschoben erhält. Die Serie von Personen bildet einen geschlossenen Block, der von der Uhr kommandiert wird

71 Ford hat bekanntlich noch einiges mehr gemacht als bloss Fabriken reorganisiert. Sein Name ist vor allem mit der Durchsetzung eines Produktionsparadigmas verbunden, das Massenproduktion und Massenkonsum auf neue Weise gekoppelt hat, doch spielt dieser Aspekt in meinem Zusammenhang keine Rolle, vgl. dazu u.a. Michael J. PIORE und Charles F. SABEL, *Das Ende der Massenproduktion*, Berlin 1985.

72 Henry FORD, *Mein Leben und Werk*, Leipzig o.J., S. 126.

73 Friedrich von GOTTL-OTTLILIENFELD, *Fordismus? Von Frederick W. Taylor zu Henry Ford*, Jena 1925, S. 11, 17.

und in gewissem Grade ganz zwangsläufig arbeitet, wie ein Mechanismus».⁷⁴ Ganz zwangsläufig, wie ein Mechanismus. Ebenso wie der Postsche Arbeiter und Turings Maschine. Ein Werkstück kommt von links, der Arbeiter A führt eine Bewegung aus, tut einen Handgriff, das Stück bewegt sich nach rechts zu Arbeiter B. Der führt wiederum eine Bewegung aus, und so weiter, im Takt. Alles ist vorgeschrieben, vorbestimmt – die Bewegung, die man auszuführen hat, die Zeit, die man dafür verwenden darf.

Taylor und Ford haben die Fabrikhallen verändert – und die Menschen, die in ihnen zu arbeiten hatten.⁷⁵ Taylor und Ford haben aber auch das Denken verändert. Sie führten vor, dass sich menschliches Handeln zergliedern lässt in Kleinstelemente, die dann beliebig verteilbar sind auf Menschen oder auf Maschinen. Handeln meint hier Bewegung, Körperbewegung. Diese wurde beobachtet, gemessen, zergliedert und neu zusammengesetzt. Das Turingmodell ist die Übertragung des tayloristischen Prinzips auf kognitive Prozesse. Komplexe mentale Prozesse werden in einfache Grundoperationen zerlegt, in mentale Handgriffe sozusagen, und dann sequentiell aneinandergereiht. Fordismus im Kopf. Das Fließband im Gehirn. Turing hat aus Denken Arbeit gemacht und die Differenz eingeebnet zwischen geistigem Höhenflug und gedanklicher Banalität. Auch die genialste Idee lässt sich zergliedern in simple Operationen – in Operationen, die so stumpfsinnig sind, dass sogar eine Maschine dazu imstande ist.

Turing ist in einer Welt aufgewachsen, in der sich die Organisation der Arbeit verändert hat – dank Taylor und Ford. Wieweit ihre Prinzipien tatsächlich umgesetzt wurden, in welchem Ausmass auch, ist eine schwierige Frage, deren Beantwortung von Land zu Land differiert. Aber auch wenn ihre praktische Wirkung vielleicht geringer war, als die beiden es sich gewünscht hätten, so wurde zumindest öffentlich darüber diskutiert. Was Ford und Taylor propagierten, was teilweise in den Fabriken geschah, das wurde rezipiert, nicht nur in den Medien, auch in der Kunst, im Film. In «Modern Times» hat Charlie Chaplin dem Fordismus ein kulturelles Denkmal gesetzt, und in gewissem Sinne hat das auch Turing getan. Im selben Jahr, nota bene. Ein Jahr zuvor, 1935, hatte der *International Congress for Scientific Management* in London getagt und damit dem Taylorismus in England eine Publizität verschafft, die er in den zwanziger Jahren, als man auf dem Festland in ihm die Lösung sah, noch nicht gehabt hatte.⁷⁶ Die schwere Depression Anfang der zwanziger Jahre habe zu einer «vollkommen apathischen Stimmung» geführt, schreibt Lyndall Urwick, selbst ein emsiger Promotor tayloristischen Gedankenguts. Niemand habe Lust gehabt zu neuen Unternehmungen.⁷⁷ Das änderte sich 1932, als in England, früher als in den

74 Zit. in JAUN (wie Anm. 69), S. 193.

75 «Krümelmonster» hat Ruedi Lüscher, dem ich (nicht nur hier) vieles verdanke, das fordistisch aufgestückelte Subjekt genannt, vgl. Rudolf M. LÜSCHER, Henry und die Krümelmonster. Versuch über den fordistischen Charakter, Tübingen 1988.

76 Zur verzögerten Rezeption des Taylorismus in England vgl. die Hinweise in URWICK, Das Wesen der Rationalisierung (wie Anm. 66), insbes. S. 41ff. und in Lyndall URWICK und E.F.L. BRECH, *The Making of Scientific Management*, Vol. I: Thirteen Pioniers, London 1957², S. 111.

77 URWICK und BRECH, *The Making of Scientific Management*, Vol. II (wie Anm. 69), S. 44. Lyndall Urwick, ein Engländer, war der erste Direktor des 1927 gegründeten *Internationalen Rationalisierungs-Instituts* in Genf, das in seinen Statuten die wissenschaftliche Betriebsführung zwar nicht explizit erwähnte, ihr aber stark verpflichtet war, vgl. Daniel WREN, *The Evolution of*

meisten andern Ländern, ein wirtschaftlicher Aufschwung einsetzte, der bis 1937 andauerte. Er war, zumindest in den führenden Industriesektoren, von erheblichen Umstrukturierungen und Investitionen begleitet, zu denen nicht zuletzt auch jene Massnahmen gehörten, die Taylor und Ford vorgeführt hatten. 1934 führte Morris, der damals grösste Automobilkonzern in England, das Fliessband ein, und 1937 kam es, ausgelöst durch den Londoner Kongress, zur Gründung des *British Management Councils*, dem ersten nationalen Zusammenschluss der bis anhin lokal operierenden Taylor-Gruppen.⁷⁸

Obgleich das, zugestandenermassen, nur verzettelte Hinweise sind, scheinen sie doch die These zu stützen, dass die Überlegungen, zu denen Turing gelangte, nicht nur wissenschaftsimmanent zu erklären sind. Turings mathematische Vorstellungswelt weist eine erstaunliche Nähe zu Konzepten auf, wie sie im Rahmen der Rationalisierungsbewegung entwickelt worden waren.⁷⁹ Turing hat auf mentale Prozesse übertragen, was sich in der klassischen Rationalisierung noch ausschliesslich auf Körperbewegung bezog. Mit Turing wird Taylor zum Opfer seiner eigenen Theorie. Taylor hatte sich und seinen Kopf noch ins Planungsbüro gerettet. Dort meinte er, vor sich selbst und seinem Programm in Sicherheit zu sein. Turing hat den Taylorismus zu Ende gedacht – *alles* lässt sich aufspalten und anschliessend mechanisieren. Nicht bloss Bewegungen, auch das Denken. Und deshalb sitzt nun anstelle des Rationalisierungsexperten eine Maschine im ehemaligen Planungsbüro.

IV

Zehn Jahre bevor es die ersten Digitalcomputer gab und man über ihre Einsatzmöglichkeiten nachzudenken begann, hat Alan Turing in einer allgemein akzeptierten mathematischen These ihre Möglichkeiten abgesteckt (und ihre Grenzen): «Any function which is effectively calculable by an abstract human being following a fixed routine is effectively calculable by a Turing machine» (vgl. auch S. 136).⁸⁰ Oder wie es Turing später, nach der Erfindung des Computers und in einer bereits stark erweiterten Version, formulierte: «Logical computing machines can do anything that could be

Management Thought, New York 1987, S. 202. Die Statuten sind abgedruckt in DEVINAT (wie Anm. 65), S. 275ff.

- 78 Vgl. Derek H. ALDCROFT, *The British Economy. Vol. 1: The Years of Turmoil 1920–1951*, Brighton 1986; URWICK und BRECH, *The Making of the Scientific Management, Vol. I* (wie Anm. 76), S. 111. Zur Diffusion der Fliessproduktion in einzelnen europäischen Ländern vgl. die Hinweise in Patrick FRIDENSON, *The Coming of the Assembly Line to Europe*, in: Wolfgang KROHN u.a. (Hg.), *The Dynamics of Science and Technology*, Dordrecht 1978, S. 159–175. Morris war zwar nicht der erste englische Automobilkonzern, der die Fliessproduktion einführte, dafür aber der grösste. Das erste Fliessband wurde 1925, also ebenfalls vergleichsweise spät, bei Austin installiert. Zur Einführung der Fliessproduktion in der Schweiz vgl. JAUN (wie Anm. 69).
- 79 Hinzu kommt, dass Turings Beschreibung des menschlichen «computers» beträchtliche Ähnlichkeit mit dem Rechenverfahren aufweist, das auch Konrad Zuse zu der Entwicklung des Digitalcomputers inspirierte (vgl. S. 126f.). Dieses bereits beträchtlich rationalisierte Verfahren war die Methode, mit der man zu dieser Zeit komplexe mathematische Probleme berechnen liess, und es ist anzunehmen, dass Turing sie kannte.
- 80 So Gandys Formulierung von Turings These, vgl. GANDY (wie Anm. 40), S. 83.

described as 'rule of thumb' or 'purely mechanical'.»⁸¹ Turings Argumentation ist eine rein theoretische, die von der physikalischen Beschaffenheit der simulierenden Maschine vollkommen abstrahiert. Turingmaschinen sind symbolische Maschinen, die technisch auf unterschiedlichste Weise realisiert sein können.⁸² Statt auf die Technik Bezug zu nehmen, rückt Turing die Eigenschaften jener in den Vordergrund, deren Verhalten simuliert wird: Mechanisierung des Denkens setzt mechanisierbares Denken voraus. Das ist, grob gesprochen, der psychologische Kern von Turings Argumentation.

Gegen Turings «Maschinenthese» lassen sich jedoch eine Reihe Einwände geltend machen, philosophischer, aber auch soziologischer Art.⁸³ Die Simulation menschlichen Verhaltens setzt voraus, dass dieses klaren Regeln folgt und diese Regeln auch bewusst, beschreibbar und verstehbar sind (vgl. S. 136). Nun ist dies keineswegs generell der Fall, sondern an spezifische *soziale* Bedingungen geknüpft, die erst möglich machen, was Turing als Regelfall postulierte. Turings kognitiv-psychologische Annahme lässt sich mit anderen Worten soziologisch relativieren, und entsprechend lautet die Frage: Unter welchen *sozialen Bedingungen* funktionieren Menschen so, wie Turing es postulierte? Wann verhalten sie sich, metaphorisch ausgedrückt, wie Maschinen?

Computer sind offensichtlich nicht überall einsetzbar, sondern vornehmlich dort, wo sich Menschen an explizite Regeln zu halten haben, in Handlungsbereichen mit anderen Worten, die bereits in starkem Masse formalisiert sind.⁸⁴ Der Einsatz von Computern setzt, anders ausgedrückt, jenen historischen Wandlungsprozess voraus, den Max Weber in seinem Bürokratisierungsmodell so eindrücklich beschrieben hat.⁸⁵ Die Computerisierung markiert nicht einen Anfang oder einen Bruch mit bisherigen Organisationsprinzipien, sondern eine neue Stufe innerhalb einer Entwicklung, die sehr viel früher begonnen hat, lange vor dem Einsatz der ersten Computer. Darauf möchte ich zum Schluss und bezogen auf den Bürobereich noch ganz kurz eingehen.

Der Einsatz der ersten Bürocomputer in den fünfziger Jahren war zunächst nur eine konsequente Weiterentwicklung eines Prozesses, der in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts mit dem Ausbau der industriellen Verwaltung eingesetzt und sich in den zwanziger Jahren im Zuge der Rationalisierungsbewegung verdichtet hatte. Was gewöhnlich als «Bürokratisierung» industrieller Verwaltung bezeichnet wird, umfasste

81 TURING, *Intelligent Machinery* (wie Anm. 53), S. 7.

82 Das ist auch das Grundprinzip der sogenannten «funktionalistischen» Antwort auf das Leib-Seele-Problem. Der Funktionalismus behauptet (im Anschluss an Turing), dass mentale Zustände funktionale Zustände sind, die physikalisch auf vollkommen unterschiedliche Weise realisiert werden können. Wie gesagt: «We could be made of Swiss cheese and it wouldn't matter.» Einer der Begründer des Funktionalismus ist Hilary Putnam, der später jedoch von seiner ursprünglichen Position abgerückt ist. Vgl. dazu verschiedene Aufsätze in PUTNAM (wie Anm. 36) sowie Alois RUST, Ist das Leib-Seele-Problem ein wissenschaftliches Problem?, in: Helmut HOLZHEY und Jean-Pierre LEYVRAZ (Hg.), *Körper, Geist, Maschine*, Bern 1987, S. 113–134.

83 Eine soziologische Diskussion ist bislang allerdings noch kaum in Gang gekommen. Die meisten Einwände stammen von philosophischer, insbes. von phänomenologischer Seite.

84 Ähnlich argumentiert auch Hubert Dreyfus, ohne jedoch die soziologische Dimension seiner Verhaltensklassifikation mitzureflektieren, vgl. Hubert L. DREYFUS, *Die Grenzen künstlicher Intelligenz*, Königstein/Ts. 1985, insbes. S. 239ff.

85 Vgl. Max WEBER, *Wirtschaft und Gesellschaft*, Tübingen 1976, insbes. S. 551ff. und 825ff.

genau genommen zwei analytisch zu trennende Prozesse, nämlich die *Formalisierung* von Arbeitsabläufen sowie die *Standardisierung* von Informationen. Während «Formalisierung» die explizite Formulierung und Verschriftlichung von Verfahrensregeln meint, die in den neunziger Jahren allmählich an die Stelle persönlicher Anweisungen und Kontrollen traten, bezeichne ich mit «Standardisierung» die explizite Festlegung, was als betriebsrelevante Information anzusehen und systematisch zu erheben ist. Standardisierung bezieht sich m.a.W. auf die Selektion von Information, auf das «pre-processing»,⁸⁶ wie Beniger es nennt, Formalisierung auf deren Verarbeitung. Beides wurde seit den späten siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts in der damals aufkommenden Management-Literatur diskutiert, auch als Antwort auf die Koordinations- und Kontrollprobleme, mit denen sich die Unternehmer angesichts wachsender Betriebsgrösse konfrontiert sahen. Dazu kam, dass mit der Grossen Depression Rentabilitätsfragen an Bedeutung gewannen und mit ihnen Verfahren zur genaueren Erfassung der Produktionskosten.⁸⁷ Die Einführung des betrieblichen Rechnungswesens hatte einen enormen Zuwachs der Informationsarbeit zur Folge, nicht nur im Verwaltungsbereich. Jeder Auftrag, jede Bestellung, jeder Arbeitsgang musste in den Werkstätten nach einer genauen Vorgabe erfasst werden, teilweise unter Verwendung von Formularen, mit denen sich bereits eine beträchtliche Standardisierung der Datenerfassung erreichen liess. Die auf diese Weise gesammelten Informationen wurden an die Verwaltung weitergegeben, dort zusammengestellt und für die Kostenberechnung weiterverarbeitet. Und das hiess konkret: abschreiben, zusammenstellen, rechnen, übertragen, vergleichen und kontrollieren. Eine eintönige, mechanische Tätigkeit, für die man seit der Jahrhundertwende immer häufiger Hilfskräfte einstellte, vorzugsweise Frauen.⁸⁸

Diese Bürokratisierungstendenzen verstärkten sich, als im Zuge der Rationalisierungsbemühungen der zwanziger Jahre die Verwaltungsarbeit weiter gestrafft wurde. Während bei der Verwaltungsreform des späten 19. Jahrhunderts Koordinations- und Kontrollprobleme sowie Rentabilitätsfragen im Vordergrund gestanden hatten,⁸⁹ waren steigende Personalkosten und der Wunsch nach grösserer Transparenz das ausschlaggebende Motiv für die Reformen der zwanziger Jahre. Zum ersten Mal wurde das Büro zum Gegenstand rationaler Planung gemacht, und diese Systematisierung war neben dem beginnenden Einsatz von Maschinen das entscheidend Neue an den Reorganisationsmassnahmen der zwanziger Jahre. Im Vordergrund stand dabei vor allem eine planvollere und übersichtlichere Gestaltung der Arbeitsabläufe, wovon man sich auch eine effizientere Nutzung der Arbeitskraft versprach. Die Massnahmen reichten von Betriebsanalysen über die Zusammenlegung von ehemals getrennten Büros bis hin zur Einführung von neuen Arbeitsmethoden. Die alten Kontorbücher wurden in den zwan-

86 James R. BENIGER, *The Control Revolution: Technological and Economic Origins of the Information Society*, Cambridge 1986, S. 15.

87 Vgl. dazu ausführlicher JAUN (wie Anm. 69), insbes. Teil I; KOCKA, *Industrielles Management* (wie Anm. 69), insbes. S. 338ff.; Mario KÖNIG u.a., *Warten und Aufrücken, Die Angestellten in der Schweiz 1870–1950*, Zürich 1985, insbes. S. 48ff.; Hannes SIEGRIST, *Vom Familienbetrieb zum Industrieunternehmen. Angestellte und industrielle Organisation am Beispiel der Georg Fischer AG in Schaffhausen 1797–1930*, Göttingen 1981, insbes. S. 38ff. und 76ff.

88 Vgl. dazu KÖNIG u.a. (wie Anm. 87), S. 53ff.

89 KOCKA, *Industrielles Management* (wie Anm. 69), S. 340.

ziger Jahren endgültig abgeschafft und durch Lose-Blätter- und Karteisysteme ersetzt, was eine enorme Vereinfachung und Zeitersparnis mit sich brachte. Gleichzeitig wurden damit die Voraussetzungen für eine erste Mechanisierung der Büroarbeit geschaffen. Die Schreibmaschine, die in der Schweiz relativ spät Verbreitung gefunden hatte, setzte sich endgültig durch, in den Buchhaltungs- und Kalkulationsabteilungen begann man die ersten Rechnungs- und Buchungsmaschinen einzusetzen und vereinzelt waren auch bereits Lochkarten-Maschinen im Gebrauch.⁹⁰

Als man dann in den späten fünfziger Jahren die ersten Computer installierte, bedeutete das zunächst nur eine Fortführung der Technisierung, die in den zwanziger Jahren eingesetzt hatte. Die ersten Rechenanlagen wurden vornehmlich dort eingesetzt, wo die Arbeit bereits stark formalisiert und standardisiert war, im Rechnungswesen, in der Lohnbuchhaltung, kurz dort, wo massenhaft gleichförmige Information nach immer gleichen und explizit formulierten Methoden erfasst und verarbeitet wurde.⁹¹ Dieser enge Zusammenhang zwischen der Arbeitsrationalisierung der zwanziger Jahre und ihrer allmählichen Computerisierung 30 Jahre später wurde damals auch klar vermerkt. Man habe vor allem jene «Routinearbeiten» auf «Elektronengeräte» umgestellt, schrieb Hans Paul Bahrtdt in seiner Angestelltenuntersuchung von 1958, die ihre «heutige Gestalt den Rationalisierungsbestrebungen der zwanziger Jahre verdanken». Sie stünden deshalb auch «in dem Geruch, rationell geordnet zu sein».⁹² Ähnlich begründet auch Thompson in seinem Bericht über *Four Years Automatic Office Work*, weshalb man den LEO vor allem in der Lohnbuchhaltung eingesetzt habe. Von allen Büroarbeiten sei die Lohnberechnung am stärksten rationalisiert gewesen, «so that, when the time came for considering the payroll as a job for a computer, it was relatively clear what the computer would have to do.»⁹³

So problemlos, wie es hier vielleicht erscheinen mag, vollzog sich die Umstellung allerdings nirgends. Denn bei den Vorbereitungsarbeiten stiess man gewöhnlich auf Rationalisierungsdefizite, die vor der Mechanisierung zu beheben waren. Häufig stelle sich heraus, schrieb Bahrtdt, dass «das bisherige System der Bearbeitung für die Umstellung nicht geeignet ist, dass es eine grosse Zahl von Lücken, Improvisationen

90 Vgl. KÖNIG u.a. (wie Anm. 87), S. 78f. und 82f. Zur Einführung der Lochkartenmaschinen vgl. auch Theo PIRKER, *Büro und Maschine*, Basel 1962, insbes. S. 86ff. Die Erfindung der Lochkartenmaschine reicht bis ins letzte Drittel des letzten Jahrhunderts zurück, als Hermann Hollerith für die Auswertung der amerikanischen Volkszählung von 1890 die erste Lochkartenmaschine entwickelte. Die Verwendung von «Hollerithmaschinen» in den zwanziger Jahren ist zwar bereits eine Form maschineller Datenverarbeitung, sie unterscheidet sich jedoch von der Elektronischen Datenverarbeitung der fünfziger Jahre vor allem darin, dass «Hollerithmaschinen» im Gegensatz zu den universellen Digitalcomputern funktionsspezifische Maschinen sind und der Datenverarbeitungsprozess erst in geringem Umfang automatisiert ist.

91 BAETHGE und OBERBECK (wie Anm. 10) bezeichnen diese erste Phase der Computerisierung als «punktuelle» Rationalisierung und grenzen davon eine «systemische» Rationalisierung ab, die in den späteren siebziger Jahren einsetzte und sich nicht mehr in erster Linie auf die fallweise und betriebsinterne Verarbeitung von massenhaft anfallenden Daten richtet, sondern das «Gesamtspektrum kaufmännisch-verwaltender Funktionsprozesse zur Disposition stellt», eingeschlossen betriebsübergreifender Prozesse (S. 61f.).

92 Hans Paul BAHRDT, *Industriebürokratie*, Stuttgart 1958, S. 72.

93 T. R. THOMPSON, *Four Years of Computer Development*, in: *The Computer Journal*, 1958, 1, 3, S. 106–112 (S. 108). Der LEO war in England der erste Computer, der ausschliesslich für kommerzielle Zwecke entwickelt worden.

und Ausnahmen enthielt, ja dass es überhaupt kaum möglich ist, alle in Betracht kommenden Möglichkeiten systematisch zu ordnen. Ohne ein streng logisch aufgebautes System *aller* Möglichkeiten scheitert aber jede Umstellung auf Hollerithmaschinen und natürlich auch auf Elektronenverfahren».⁹⁴ Vor der Computerisierung hatte man also die Lücken zu schliessen, die die frühen Rationalisierungsmassnahmen noch offen gelassen hatten, und das waren organisatorische Eingriffe, die durch die angestrebte Technisierung zwar ausgelöst worden waren, aber einen von ihr unabhängigen Rationalisierungseffekt hatten, der keineswegs zu unterschätzen ist.

Mit dem Einsatz von Computern wurden nicht nur Rationalisierungslücken entdeckt. Mit der Zeit gerieten auch Handlungsbereiche in den Blick, die sich gegen eine Mechanisierung zunächst zu sperren schienen. Handlungsbereiche mit andern Worten, bei denen die notwendigen organisatorischen Voraussetzungen für einen effizienten Computereinsatz (noch) nicht gegeben waren. Während in einer ersten Phase Arbeiten mechanisiert wurden, die bereits in grossem Umfang rationalisiert gewesen waren, begann man mit der Zeit, Arbeitsverläufe zu systematisieren, die ursprünglich als mechanisierungsresistent gegolten hatten. Bereits 1963 schrieben Urs Jaeggi und Herbert Wiedemann, es sei «weit mehr Angestelltenarbeit automatisierungsfähig, als ursprünglich angenommen wurde», und erklärten diese unerwartet weitreichende Mechanisierung mit dem «analytischen Vorgehen der Programmiereteams, die ganze Arbeitsabläufe und nicht nur beschränkte Teilbereiche neu konzipieren»⁹⁵ – mit Massnahmen also, mit denen man Arbeitsverläufe systematisch umgestaltete und formalisierte und auf diese Weise erst die Voraussetzungen für eine anschliessende Computerisierung schuf. Was Jaeggi und Wiedemann damals noch als Novum beschrieben, die systematische Reorganisation der Büroarbeit unter dem Blickwinkel ihrer Computerisierbarkeit, ist heute zum Normalfall geworden. Mit solchen Reorganisationsmassnahmen setzte ein, was man allgemein als «computerförmige» Zurichtung sozialer Wirklichkeit bezeichnen könnte, und sie vor allem ist es, die zahllose Kritiker auf den Plan ruft.

Diese Kritik an der Zurichtung sozialer Realität unter dem Blickwinkel ihrer Computertauglichkeit ist jedoch nicht zu verwechseln mit einer Computerkritik, die den Begriff der «instrumentellen Vernunft» technikdeterministisch verkürzt.⁹⁶ Die These, die Computertechnologie zersetze per se die Sphäre kommunikativer Rationalität, bis am Ende nur noch dürres «System» ist, wo einst beredete «Lebenswelt» war, ist gewissermassen die technokratische Version von Jürgen Habermas' Kolonialisierungstheorem. Demnach wäre Max Webers «lebende Maschine» nicht die Voraussetzung, sondern das Resultat der Durchsetzung einer Technologie, die, so eine ebenso verbreitete wie penetrante Klage, Denken «digitalisiert» und Handeln «algorithmi-

94 BHRDT (wie Anm. 92), S. 71.

95 Urs JAEGGI und Herbert WIEDEMANN, Der Angestellte im automatisierten Büro. Betriebssoziologische Untersuchung über die Auswirkungen der elektronischen Datenverarbeitung auf die Angestellten und ihre Funktionen, Stuttgart 1963, S. 2.

96 Vgl. dazu auch Thomas MALSCH, Die Informatisierung des betrieblichen Erfahrungswissens und der «Imperialismus der instrumentellen Vernunft». Kritische Bemerkungen zur neotayloristischen Instrumentalismuskritik und ein Interpretationsvorschlag aus arbeitssoziologischer Sicht, in: Zeitschrift für Soziologie, 1987, 16, 2, S. 77–91.

siert». Dass die Beziehungen zwischen Rationalisierung und Computerisierung um einiges verwickelter – um nicht zu sagen: «dialektischer» sind, als es die Techno-These der computerinduzierten «instrumentellen Vernunft» unterstellt, hoffe ich ansatzweise gezeigt zu haben.