

Hans-Willy Hohn

Kognitive Strukturen
und Steuerungsprobleme
der Forschung

Kernphysik und Informatik
im Vergleich

Campus

Hans-Willy Hohn

Kognitive Strukturen und Steuerungsprobleme der Forschung

Kernphysik und Informatik im Vergleich

Campus Verlag
Frankfurt/New York

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Hohn Hans-Willy:

Kognitive Strukturen und Steuerungsprobleme der Forschung:

Kernphysik und Informatik im Vergleich / Hans-Willy Hohn. – Frankfurt/Main;

New York: Campus Verlag, 1998

(Schriften des Max-Planck-Instituts für Gesellschaftsforschung, Köln; Bd. 36)

ISBN 3-593-36102-7

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Copyright © 1998 Campus Verlag GmbH, Frankfurt/Main.

DTP: Thomas Pott, Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung, Köln.

Druck und Bindung: KM-Druck, Groß-Umstadt.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

Für Susanne

Inhalt

Abbildungen und Tabellen	10
Abkürzungen	11
Danksagung	15
Kapitel 1	
Forschungspolitik und Wissenschaftssoziologie – eine neue Annäherung	17
1.1 Forschungsplanung als altes und neues Problem der Wissenschaftssoziologie	17
1.2 Die Rolle der Forschungspolitik in der traditionellen und in der Kuhnschen Wissenschaftssoziologie	34
1.3 Entzauberung und Dekonstruktion der Wissenschaft durch die neue Wissenssoziologie	40
1.4 Auswege aus der konstruktivistischen Konfusion – Forschungshandeln als Problemlösungshandeln und ein Kontingenzmodell von Forschungsorganisation	46
Kapitel 2	
Wege und Irrwege der Kernphysik	63
2.1 Der Aufstieg einer »small science« zur »big science«	63
2.2 Start und Stagnation der Kernphysik	69
2.3 Experimentelle Innovationen – die »glücklichen dreißiger Jahre«	75
2.4 Entdeckung der Kernspaltung und Stabilisierung ihrer theoretischen Deutung	82

Kapitel 3	
Wege zur kernphysikalischen Großforschung	92
3.1 Kognitive Struktur der kerntechnischen Forschung und die Formierung des atompolitischen Netzwerks in der Bundesrepublik	92
3.2 Koordinationsprobleme der deutschen Atompolitik und das »lock-in« des Leichtwasserreaktors als suboptimale Lösung	101
3.3 Brutreaktoren als kerntechnisches Optimum und Weg in die Großforschung	108
3.4 Aufgabenstruktur und Funktionsweise der kerntechnischen Großforschung	113
Kapitel 4	
Entdeckung des Computers	131
4.1 Wissenschaftssoziologische Konstruktionen und reale Konstrukte	131
4.2 Frühe Rechentechnik und formale Logik	136
4.3 Abstrakte und konkrete Maschinen	143
4.4 Die Entdeckung der Universalmaschine und das »lock-in« der Von-Neumann-Architektur	151
Kapitel 5	
Entstehung der Informatik	161
5.1 Numerik, Kybernetik und frühe Computer science	161
5.2 Der Kalte Krieg und die Softwaretechnik	171
5.3 Kommerzielle Programmiersprachen und der Beitrag von ALGOL zur Entstehung der Informatik	179
5.4 Computer science als Formalwissenschaft	187
Kapitel 6	
Entwicklungslinien der Informatik und Normierungsprobleme der Softwaretechnik	195
6.1 Vielfalt und Heterogenität – das Dilemma der Informatik und die Normierung der Softwaretechnik	195

6.2	Wildwuchs der Programmiersprachen und frühe Muster der Standardisierung in der Datenverarbeitung	204
6.2.1	Das ALGOL-Drama	204
6.2.2	Rechnerfamilien und das erneute Scheitern der Komiteestandardisierung	214
6.3	Symbiose der Softwaretechnik mit der Elektronik und ihr Eigenleben gegenüber der Informatik	218
6.4	Rückschläge der Informatik, Schiffbruch von Ada und die verschlungenen Pfade von C zur weltweiten Norm	228
6.5	Von der Abstraktion in die Komplexität des Einzelfalls – Entwicklungstendenzen der Programmierung	238
6.6	Vages Wissen und tiefe Modellierungen – Lehren aus der Renaissance der KI-Forschung	240
6.7	Unschärfe Systeme – neue Perspektiven der Wissensverarbeitung	246
6.8	Zwischen Formalisierung und Verstehen – die duale Struktur der Informatik	251

Kapitel 7

	Steuerungsprobleme der informatischen Großforschung und die Performanz der Kontextsteuerung	259
7.1	Die Odyssee der GMD	259
7.2	Fehlstart – informatische Großforschung als Mathematik	263
7.3	Kurskorrektur ohne Landkarte	270
7.3.1	Erste Strukturreform und die Suche nach der großen Aufgabe	270
7.3.2	Zersplitterte Projekte und Transferprobleme	275
7.4	Kurskorrektur im Kurswechsel – neuer Reformversuch, die japanische Herausforderung und gescheiterte Großprojekte	284
7.5	Kontextsteuerung als Alternative – der Erfolgskurs der FhG	293

Kapitel 8

	Fazit: Die Organisationssoziologie als Hilfswissenschaft der Wissenschafts- und Technikforschung	305
	Literatur	323
	Sach- und Personenregister	345

Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

1	Ein Kontingenztmodell von Forschungskooeration	56
2	Auszahlungsmatrix »Battle of the Sexes«	200

Tabellen

1	Finanzhaushalte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung sowie der informationstechnischen Institute der Fraunhofer-Gesellschaft 1980 bis 1990	298
2	Haushaltsstrukturen GMD und IITB 1984 bis 1990	299

Abkürzungen

ACM	Association for Computing Machinery
AEC	Atomic Energy Commission
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen
AEG	Allgemeine Electricitäts-Gesellschaft
ANSI	American National Standards Institute
AT&T	American Telephone & Telegraph
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor
BMAt	Bundesministerium für Atomenergie
BMBW	Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft
BMEWS	Ballistic Missile Early Warning System
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BMI	Bundesministerium des Innern
BMVtg	Bundesministerium der Verteidigung
BMwF	Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung
CCITT	Consultative Committee for Telephone and Telegraph
DAtK	Deutsche Atomkommission
DEC	Digital Equipment Corporation
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFR	Deutscher Forschungsrat
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoD	Department of Defense
DRZ	Deutsches Rechenzentrum Darmstadt
DVL	Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EURATOM	Europäische Atomgemeinschaft

EVU	Energieversorgungsunternehmen
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft
GaMM	Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik
GI	Gesellschaft für Informatik
GKSS	Forschungszentrum Geesthacht
GMD	Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung
IAO	Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
IAS	Institute for Advanced Studies
IBM	International Bureau Machines
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
IFIP	International Federation for Information Processing
IFT	Institut für Festkörpertechnologie
IGD	Institut für Graphische Datenverarbeitung
IIM	Institut für Instrumentelle Mathematik
IIS	Institut für Integrierte Schaltungen
IITB	Institut für Informations- und Datenverarbeitung (vormals Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie)
IMS	Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme
IPA	Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
IPK	Institut für Produktions- und Konstruktionsanlagen
IPM	Institut für Physikalische Meßtechnik
ISO	International Standards Organization
KfA	Kernforschungsanlage Jülich
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe
LIFE	Laboratory for International Fuzzy Engineering Research
MAN	Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg AG
MIDAS	Missile Defense Alarm System
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MITI	Ministry for International Trade and Industry
MPG	Max-Planck-Gesellschaft
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NORAD	North American Air Defense System
NTG	Nachrichtentechnische Gesellschaft
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PTT	Postal, Telegraph and Telephone Administration
RCA	Radio Corporation of America

RGW	Rat für Gegenseitige Wirtschaftshilfe der Warschauer-Pakt-Staaten
RWE	Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerke
SACCS	Strategic Air Command Control System
SAGE	Semi Automatic Ground Environment
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNO	United Nations Organization
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VEW	Vereinigte Elektrizitätswerke

Danksagung

Bei der hier vorgestellten Studie handelt es sich um die überarbeitete Fassung meiner Habilitationsschrift, die die Fakultät für Soziologie der Universität Bielefeld im Dezember 1997 angenommen hat. An beiden Versionen haben viele Personen hilfreich mitgewirkt. Dank schulde ich zuallererst meinen zahlreichen Interviewpartnern aus der Wissenschaft, Wirtschaft und Politik, die mir mit großer Geduld und Engagement in ausführlichen und oft mehrmaligen Gesprächen Auskunft gaben und mich nicht selten erst gelehrt haben, die richtigen Fragen zu stellen. Ohne ihre Unterstützung hätte diese Studie nicht entstehen können. Gleichwohl muß ich, um die ihnen zugesicherte Anonymität zu wahren, darauf verzichten, meine Gesprächspartner im einzelnen zu nennen.

Namentlich danken darf und will ich aber Prof. Dr. Dr. h.c. Franz Xaver Kaufmann, Prof. Dr. Wolfgang Krohn, Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Renate Mayntz und Prof. Dr. Peter Weingart als den Gutachtern der Habilitationsschrift, deren ausführliche und konstruktive Kritiken eine große Hilfe bei ihrer Überarbeitung zur Publikation waren. Vor allem bin ich Prof. Kaufmann zu Dank verpflichtet. Er hat den Werdegang der Arbeit nicht nur mit der ihm eigenen freundlichen und verständnisvollen Unnachgiebigkeit begleitet, von der ich bereits als Student profitieren konnte, sondern auch zur Lösung von Problemen beigetragen und mich durch schwierige Situationen gelotst, die ihre Fertigstellung zu verzögern drohten. Es ist kaum möglich, sich einen kompetenteren und engagierteren akademischen Lehrer vorzustellen.

Hilfreich waren aber auch die kritischen Anmerkungen und Hinweise der Gutachten, die Prof. Dr. Helga Nowotny und Dr. Raymund Werle speziell im Hinblick auf die Veröffentlichung der Studie angefertigt haben. Helga Nowotny bewahrte mich mit großer Aufmerksamkeit vor einigen irrtümlichen Behauptungen und Raymund Werle verlangte mir einen letzten redaktionellen Schliff des Manuskripts ab, für den ich ihm jetzt ebenfalls dankbar

bin. Formelle Fehler hat Stefan Lange in mehreren Zwischenredaktionen eliminiert und die professionelle Herstellung der Druckvorlage besorgte in seiner schon gewohnt ungewöhnlichen Schnelligkeit und Zuverlässigkeit Thomas Pott. Trotz all der Hilfe, die ich erfahren habe, trage ich jedoch die Verantwortung für diese Studie allein.

Mehr als Dank schließlich schulde ich aber meiner Frau Susanne für die Unterstützung meiner Arbeit. Ihr ist dieses Buch gewidmet.

Köln, im Juli 1998

Hans-Willy Hohn

Kapitel 1

Forschungspolitik und Wissenschaftssoziologie – eine neue Annäherung

1.1 Forschungsplanung als altes und neues Problem der Wissenschaftssoziologie

In dem vorliegenden Buch geht es um einen wissenschaftssoziologischen Vergleich der Funktionsweise und sozialen Organisationsform der Kernphysik und Kerntechnik mit der Informatik und Informationstechnik. Dieser Vergleich wurde von der steuerungstheoretischen Frage motiviert, warum sich die kerntechnische Forschung in erfolgreicher Weise als staatlich geplante Großforschung organisieren ließ und zum Vorbild der öffentlichen Forschungsförderung schlechthin werden konnte, während diese Form von Forschungsorganisation in der Informationstechnik stets große Probleme aufwarf und die informatische Großforschung keinen stabilen Erfolgskurs einschlagen konnte. Die Arbeit knüpft damit unmittelbar an empirische Befunde der Studie »Konflikte und Gleichgewichte im Forschungssystem« von Hohn und Schimank (1990) an, bezieht sich aber zugleich auch auf die wissenschaftssoziologisch-steuerungstheoretische Debatte, wie sie in den späten siebziger und frühen achtziger Jahren vor allem im Rahmen der Bielefelder Studien zur »Geplanten Forschung« (van den Daele/Krohn/Weingart [Hrsg.] 1979) noch auf der Basis des Kuhnschen Deutungsschemas der wissenschaftlichen Entwicklung geführte wurde, und plädiert dafür, diese Debatte aus einem neuen theoretischen und empirischen Blickwinkel wieder aufzunehmen.

Dieses Plädoyer gründet sich seinerseits auf eine kritisch-konstruktive Auseinandersetzung mit den Science and Technology Studies. Es hat den Nachweis zum Ziel, daß es seit langem möglich und längst an der Zeit ist, den sozialkonstruktivistischen Ansatz auf forschungspolitische und institutionelle Fragestellungen anzuwenden, wie sie noch von den Bielefelder Studien verfolgt wurden, und beide Perspektiven in fruchtbarer Weise mitein-

ander zu verbinden. Der Konstruktivismus hat viele neue Einsichten in die Entwicklungsdynamik der Wissenschaft geliefert – soziologisch wie epistemologisch. Doch er ist auch bei der Feststellung stehengeblieben, daß das wissenschaftliche Wissen konstruiertes und fabriziertes Wissen ist. Diese Feststellung kann jedoch nur der Ausgangspunkt für eine soziologische Theorie der Produktion des wissenschaftlichen Wissens sein, nicht ihr Resultat. Ein erster Schritt in die Richtung auf eine solche Theorie wird indes möglich, wenn die Wissenschaftssoziologie vor dem Hintergrund der konstruktivistischen Empirie an die Modelle und Befunde der Organisationssoziologie anknüpft, die, wie dies Richard Whitley (1984) erstmals betont hat, nicht nur eine Antwort auf die Frage bereit hält, wie und warum unterschiedliche Forschungsfelder in ihren sozialen und institutionellen Strukturen voneinander abweichen. Die Organisationssoziologie kann darüber hinaus in der Tat viel zur Erklärung des Erfolgs oder Mißerfolgs forschungspolitischer Steuerungsversuche beitragen. Insbesondere lassen sich aus ihrer Perspektive Aussagen darüber machen, ob und in welchem Maße bestimmte politische Steuerungsmaßnahmen und organisatorische Designs der kognitiven Dynamik eines Forschungsfeldes angemessen sind. Vor diesem Hintergrund kann dann auch deutlich werden, daß ein »misfit« oder »mismatch« zwischen dem organisatorischen Modell der Großforschung und der kognitiven Struktur der Informatik besteht.

Das organisatorische Modell der Großforschung läuft auf eine hierarchische Form der Forschungssteuerung hinaus, bei der die Politik bestimmte Forschungsziele vorgibt und ihre Umsetzung kontrolliert. Es ist ein bürokratisches Rationalmodell von Forschungsorganisation, das aus der Kernforschung hervorging, bis zum Ende der siebziger Jahre die höchste Priorität in der Forschungspolitik des Bundes genoß und im übrigen heute noch den größten Anteil seiner institutionellen Forschungsförderung ausmacht (Hohn/Schimank 1990). Die zentrale Rolle, die dieses Modell in der Forschungspolitik des Bundes einnahm und einnimmt, ist zunächst einmal darauf zurückzuführen, daß sich der Bundesregierung lange Zeit auch wenig Alternativen zur Großforschung boten, wenn sie überhaupt nennenswerte Kompetenzen auf dem Gebiet der Forschungsförderung an sich ziehen wollte. Als Kulturpolitik lag die Forschungspolitik in der Bundesrepublik ursprünglich in der alleinigen Zuständigkeit der Länder, die dem Bund erst nach und nach und im Zuge eines fast zwanzigjährigen verfassungspolitischen Konflikts eigenständige Kompetenzen in diesem Bereich einräumten. Eine Ausnahme hiervon machte im wesentlichen nur die kerntechnische Großforschung, die als eine Aufgabe von »gesamstaatlichem Interesse« schon in den fünfziger

Jahren in die Zuständigkeit des Bundes übergang. Die Großforschung war damit das einzige forschungspolitische Gebiet, auf dem die Bundesregierung über eine eigene, von den Ländern weitgehend unabhängige »Hausmacht« und Handlungsautonomie verfügte (Hohn/Schimank 1990).

Zugleich galt dieses Modell von Forschungsorganisation aber auch als der Königsweg der staatlichen Forschungspolitik. Mit den kerntechnischen Zentren schien die Forschungspolitik des Bundes über ein generalisierbares Modell von Forschungsorganisation zu verfügen, das sich in besonderem Maße dazu eignete, die Forschung am Innovationsbedarf der Wirtschaft zu orientieren und in effizienter Weise den Transfer von der Grundlagenforschung zur Anwendungsforschung zu organisieren. Es stand für den Typus einer ziel- und produktorientierten Forschung, die genau »zwischen« der autonomen akademischen Grundlagenforschung und der industriellen Entwicklung angesiedelt war und zur Aufgabe hatte, die »Lücke« zwischen dem wissenschaftlichen Grundlagenwissen und dem technischen Anwendungswissen zu schließen. Diese Lücke galt es um so dringlicher auszufüllen, als dem raschen Transfer des wissenschaftlichen Grundlagenwissens in markt-reife technische Produkte für die internationale Konkurrenzfähigkeit der deutschen Wirtschaft zweifelsfrei eine wachsende strategische Bedeutung zukam und diese Aufgabe weder von der Wissenschaft noch von der Wirtschaft selbst zuverlässig erfüllt wurde.

Zudem hatte sich das Modell der Großforschung bei dieser Aufgabe bestens bewährt. Mit ihm war es im Rahmen einer relativ straffen hierarchischen Steuerung und Kontrolle der Projekte gelungen, in nur wenigen Jahren mit anderen Ländern gleichzuziehen und der deutschen Kernforschung einen internationalen Spitzenplatz zu sichern. Es sprach auch nichts dagegen, die Organisationsform der Großforschung auf Forschungsfelder außerhalb der Kerntechnik auszudehnen. Die Kernphysik und Kerntechnik schienen für ein generell gültiges Modell der wissenschaftlichen Entwicklung zu stehen, in dem basale technologische Innovationen stets den Weg von der Grundlagenforschung in die technische Anwendungsforschung nahmen. Dies lehrte vor allem die Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung, die am Ende der sechziger und am Beginn der siebziger Jahre nicht nur große Teile der Wissenschaftsforschung beherrschte, sondern vielfach gleichermaßen zum »common knowledge« der Forschungspolitik zählte. Kuhn postulierte ein einheitliches Phasenmodell der wissenschaftlichen Entwicklung, das er nicht zuletzt am Beispiel der Kernphysik gewonnen hatte, demzufolge aber prinzipiell jede wissenschaftliche Disziplin ein prä-paradigmatisches, paradigmatisches und schließlich post-paradigmatisches Stadium

durchlief, das in ihrer technischen »Anwendungsreife« als Normalwissenschaft mündete. Das organisatorische Modell der Großforschung entsprach genau diesem theoretischen Modell der wissenschaftlichen Entwicklung, indem es den Übergang eines Forschungsfeldes zur post-paradigmatischen Normalwissenschaft organisierte.

Alles in allem hatte der Bund also durchaus gute Gründe, aus der Not seiner Beschränkung auf die Großforschung eine Tugend zu machen und auf dieses Modell zu setzen. Nachdem die Ära der Großforschung in den fünfziger Jahren mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und der Kernforschungsanlage Jülich (KfA) begonnen hatte, schuf die Bundesregierung in den sechziger Jahren drei weitere Forschungszentren auf diesem Gebiet und gründete dann in den siebziger Jahren nach dem Vorbild der kerntechnischen Forschung acht weitere solcher Einrichtungen auf Feldern wie der Luft- und Raumfahrt, der Krebsforschung oder der Biologie. Dabei setzte sie insbesondere große Hoffnungen darauf, mit diesem organisatorischen Modell den Vorsprung der USA auf dem Feld der Informatik und Informationstechnik aufzuholen.

Während die bundesdeutsche Forschungspolitik im Fall der kerntechnischen Großforschung tatsächlich in nur wenigen Jahren auf einen stabilen Erfolgskurs geriet, hat sie mit diesem Modell auf anderen Wissensgebieten einen vergleichbaren Erfolgskurs jedoch nicht mehr einschlagen können. Den »großen Erwartungen« an diese Form der Forschungsorganisation in den sechziger Jahren folgten in den siebziger und achtziger Jahren angesichts ihrer zum Teil in der Tat geringen Performanz »enttäuschte« und »reduzierte Erwartungen« (Hohn/Schimank 1990: 233–295). Glaubte man anfänglich, der staatlichen Forschungsförderung mit dem Modell der Großforschung eine einheitliche organisatorische Struktur geben zu können, so lief die faktische Entwicklung auf eine starke Diversifizierung der Zentren hinaus. Keine Großforschungseinrichtung gleicht in ihrer Funktionsweise und organisatorischen Struktur der anderen und ihre Gemeinsamkeiten reduzieren sich im wesentlichen auf ihren rechtlichen Rahmen und ihren Finanzierungsmodus (Meusel 1982: 28–29; Hohn/Schimank 1990: 235–236). Auch die Bielefelder Studien stellten bereits eine große Varianz in der Performanz und Funktionsweise der Großforschungszentren dar. Neben unbestreitbaren steuerungspolitischen Erfolgen zeugten die dort erhobenen Fallbeispiele ebenso oft von einem Versagen der forschungspolitischen Instrumente und Maßnahmen. Zudem entsprachen die Formen der Forschungsorganisation auf Feldern wie der Krebsforschung (Hohlfeld 1979), der Umweltforschung (Küppers/Lundgreen/Weingart 1979) oder der Biotechnologie (Buchholz

1979) kaum einem bürokratischen Rationalmodell, wie dies für eine staatlich gesteuerte Forschung zu erwarten gewesen wäre.

Vor allem aber weicht die informatische Großforschung vom einstigen Vorbild der Zentren in Karlsruhe und Jülich ab. Die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) gilt in der Forschungspolitik des Bundes seit langem als ein besonders schwieriger Problemfall unter den deutschen Großforschungseinrichtungen, bei dem sich hartnäckig Mißerfolge an Mißerfolge reihen (Stucke 1993). Trotz der zum Teil großen innerwissenschaftlichen Reputation, die sich diese Einrichtung mit vielen Forschungsbeiträgen in der Informatik weltweit erworben hat, ist aus ihr bis heute kein Produkt hervorgegangen, das informationstechnische Maßstäbe gesetzt oder zu nennenswertem wirtschaftlichem Erfolg geführt hätte. Die Gesellschaft hat es nie vermocht, klare Prioritäten zu entwickeln, ihre Aktivitäten auf diese Ziele zu bündeln und ihre Forschungsergebnisse erfolgreich in die Wirtschaft zu transferieren. Stattdessen wird sie immer wieder von intraorganisatorischen Auseinandersetzungen um ihre Forschungsziele und interorganisatorischen Konflikten mit ihren politischen Auftraggebern und wirtschaftlichen Adressaten erschüttert und ist Gegenstand geradezu permanenter Strukturreformen (Hohn/Schimank 1990: 276–277).

Aus der Perspektive der vorliegenden Arbeit sind diese Probleme der informatischen Großforschung allerdings nicht von akzidentieller Natur. Sie gehen nicht auf eine unglückliche Verkettung von administrativen Fehlentscheidungen zurück, wie dies in der Forschungspolitik häufig angenommen wird, sondern haben vielmehr systematische Gründe. Die Wahl der Kernphysik und Kerntechnik zum Vorbild der staatlichen Forschungsorganisation beruhte auch in wissenschaftstheoretischer Hinsicht auf der Generalisierung eines fehlgedeuteten Einzelfalls. Sowohl die Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung, wonach jede wissenschaftliche Disziplin einheitliche »Reifephasen« durchläuft, als auch das aus ihr abgeleitete lineare Transfermodell müssen heute als falsifiziert betrachtet werden. Die Vorstellung, daß es so etwas wie einen einheitlichen Kausalpfeil von der Grundlagenforschung zur Anwendungsforschung gibt, ist falsch. Das institutionelle Design der Großforschung als Transferforschung konfligiert deshalb in vielen Fällen mit den kognitiven Bedingungen des jeweiligen Forschungsfeldes, und insbesondere besteht ein »mismatch« oder »misfit« zwischen diesem Modell von Forschungsorganisation und der kognitiven Struktur der Informatik und Informationstechnik.

Schon die Bielefelder Studien widerlegten durch ihre empirischen Ergebnisse ihre eigenen Kuhnschen Prämissen. Die Kuhnsche Theorie schien

zeitweise sowohl eine fruchtbare Alternative zur traditionellen Mertonschen Wissenschaftssoziologie als auch Ansatzpunkte für forschungspolitische und steuerungstheoretische Überlegungen zu bieten. Auf der Basis dieser Theorie setzten sich die Bielefelder Studien in einer aus heutiger Sicht noch sehr moderaten Weise kritisch mit der Annahme des Mertonschen Ansatzes auseinander, daß der Wissenschaft ein epistemischer Sonderstatus zukäme und wissenschaftliches Wissen der soziologischen Analyse nicht zugänglich sei. Dementsprechend hatte die Mertonsche Wissenschaftssoziologie das wissenschaftliche Wissen als »black box« behandelt und soziale, politische oder institutionelle Faktoren als neutrale Rahmenbedingungen einer ansonsten autonomen und rein intern gesteuerten Entwicklung der Wissenschaft betrachtet. Die Kuhnsche Wissenschaftssoziologie brach dann erstmals mit dem Mertonschen Postulat vom epistemischen Sonderstatus der Wissenschaft, indem sie im Rahmen einer vorwiegend historischen Argumentation kognitive Brüche in der Entwicklung der Wissenschaft identifizierte und insbesondere erstmals den Einfluß sozialer, politischer und wirtschaftlicher Nutzenkalküle auf die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens in Betracht zog, die im traditionellen Rationalmodell der Wissenschaft schlichtweg keine Rolle spielten. Das Kuhnsche Phasenmodell der wissenschaftlichen Entwicklung schien den Bielefelder Studien zufolge außerdem für die säkulare Tendenz einer »Finalisierung der Wissenschaft« und ihrer generellen Ausrichtung an gesellschaftlichen Nutzenerwartungen zu sprechen. Zugleich aber blieb dieses Phasenmodell nach wie vor einer stark internalistischen Perspektive verhaftet. Im Rahmen dieses Modells schritt die Wissenschaft zunächst einmal unabhängig von politischen und institutionellen Kontextbedingungen und ungeachtet aller gesellschaftlichen Nutzenerwartungen voran und internalisierte solche Erwartungen erst, wenn die theoretischen Grundlagen hierfür vollständig geklärt waren. Bis zu diesem Punkt verhielt sie sich indifferent und »resistent« gegenüber wissenschaftsexternen Zwecksetzungen.

Tatsächlich aber hielt dieses Modell der empirischen Überprüfung durch die Bielefelder Studien nicht stand. Die Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung erwies sich angesichts der Varianz, die das empirische Material dieser Studien zu Tage förderte, als ein nach wie vor unrealistisch einheitliches Modell der wissenschaftlichen Entwicklung. Statt einer geordneten Abfolge von grundagentheoretischen und anwendungsbezogenen Forschungsaktivitäten stellten sich als Folge forschungspolitischer Programme unerwartete Ramifikationen und Bifurkationen in der Entwicklung ganzer Disziplinen ein, mit denen sich das Bild einer komplexen und hoch

kontextsensitiven Interaktion der Wissenschaft mit ihrer politischen und institutionellen Umwelt abzeichnete. Das Kuhnsche Modell ließ dementsprechend weder systematische Vergleiche zwischen den Fallbeispielen zu, noch konnte es im Einzelfall den Erfolg oder das Versagen staatlicher Steuerungsversuche erklären.

Dieses Modell der wissenschaftlichen Entwicklung geriet dann zeitlich nahezu parallel zu den Bielefelder Studien auch an einer weiteren Front in das Kreuzfeuer der Kritik, die durch den sozialkonstruktivistischen Ansatz eröffnet wurde. Die Science and Technology Studies waren von einer radikalen epistemischen Kritik am traditionellen Rationalmodell der Wissenschaft motiviert und konzentrierten sich mit einem neuen Typus von empirischen Untersuchungen hauptsächlich auf mikrosoziologische Untersuchungen des Forschungsprozesses, mit denen sie die »black box« der wissenschaftlichen Wissensproduktion erstmals konsequent öffneten. Diese Studien haben der Wissenschaft den Nimbus eines epistemisch privilegierten Systems mit einer überlegenen Rationalität genommen und gezeigt, wie sehr die Produktion und die Evaluation des wissenschaftlichen Wissens und technologischer Artefakte von kontingenten technischen, sozialen und politischen Faktoren beeinflusst werden. Die Ausdehnung ihres ursprünglich mikrosoziologischen Ansatzes zu einem netzwerktheoretischen Konzept führte die sozialkonstruktivistischen Studien dann zu dem Ergebnis, daß sich wissenschaftliche Theorien und technische Artefakte nicht aufgrund ihres überlegenen »Wahrheitsgehalts« oder Nutzens etablieren, sondern im Rahmen von Interessenauseinandersetzungen und theoriepolitischen Strategien innerhalb sozialer Netzwerke eine »Leiter der Faktizität« (Latour 1987) aufsteigen, auf der Sprosse für Sprosse lokale Ungewißheit in globale Gewißheit transformiert wird.

Der Sozialkonstruktivismus hat die Mertonschen Vorstellung vom epistemischen Sonderstatus der Wissenschaft definitiv widerlegt und ebenso Kuhns Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung überwunden. Er ist jedoch in epistemischer Kritik steckengeblieben und begnügt sich mit der Demontage einer positivistischen Position, die in dieser Form kaum jemand vertreten hat, geschweige denn heute noch vertritt. Obwohl gerade dieser Ansatz mit dem Ziel antrat, die sozialen Einflüsse auf die Entstehung und Validierung des wissenschaftlichen Wissens nachzuweisen, und die staatliche Forschungspolitik seit langem maßgeblichen Einfluß auf die Konstruktion dieses Wissens nimmt, ist er nicht bis zur Ebene der institutionellen Bedingungen des Forschungshandelns vorgedrungen, sondern beschränkt sich in der Hauptsache auf mikrosoziologische Laborstudien. Zugleich ist sein

analytisches Instrumentarium kaum elaboriert und taugt wenig dazu, die Konfusion zu reduzieren, die innerhalb dieses Ansatzes herrscht. Die Science and Technology Studies bestreiten vielfach, daß es Sinn macht, zwischen kognitiven und sozialen Variablen zu unterscheiden und benutzen statt dessen Schlüsselbegriffe wie »sociotechnical ensembles«, »intimately interconnected, heterogeneous ensemble of technical, social, political, and economic elements« (Bijker 1995: 249) oder kurz »seamless webs« (Hughes 1986). Sie identifizieren jedoch auch keine Differenzen zwischen unterschiedlichen Forschungsfeldern, sondern konfrontieren uns mit einer Hyper-Kontingenztheorie der wissenschaftlichen Entwicklung, in der alles Wissen gleichermaßen ungewiß erscheint und in der die Mechanismen der Stabilisierung von Fakten und Artefakten in sozialen Netzwerken gleichermaßen kontingent sind. So bleibt es völlig unklar, warum etwa die Biologie, die den konstruktivistischen Untersuchungen häufig als Beispiel dient, ihre Forschung vielfach anders organisiert als große Teile der Physik, die dagegen im Kuhn'schen Modell der wissenschaftlichen Entwicklung stets breiten Raum einnahm, und warum es bestimmten Konzepten gelingt, innerhalb sozialer Netzwerke die »Leiter der Faktizität« zu erklimmen, während andere hieran scheitern.

Die zentrale These der hier präsentierten Arbeit besteht denn auch darin, daß es nach wie vor durchaus Sinn macht, zwischen kognitiven und sozialen Variablen zu unterscheiden, und daß sich plausible Antworten auf diese Fragen nicht ohne den Rekurs auf die kognitiven Strukturen der Wissenschaft entwickeln lassen. Gleichzeitig bedarf das Konzept der kognitiven Struktur aber in der Tat einer grundlegenden Revision im Lichte der konstruktivistischen Forschungsbefunde. Kämmt man die konstruktivistische Literatur gewissermaßen gegen den Strich und ersetzt die dort vermeintlich identifizierte A-Rationalität des wissenschaftlichen Wissens durch kognitive Ungewißheit, so gelangt man zu einem Rationalitätsmodell des Forschungshandelns, das den empirischen Befunden der neuen Wissenssoziologie durchaus Rechnung trägt, sich aber gleichermaßen dazu eignet, die Konfusion, die von den Science and Technology Studies vielfach erzeugt worden ist, zu überwinden. Die konstruktivistische Wissenschaftssoziologie hat das traditionelle Rationalmodell der Wissenschaft definitiv widerlegt und betont zu Recht die hohe Kontingenz des wissenschaftlichen Wissens, doch aus dieser Widerlegung folgt weder, daß die Wissenschaft a-rational verfährt, noch daß dieses Wissen jene idiosynkratischen Züge trägt, die ihm relativistische Positionen zuweisen. Die Widerlegung der traditionellen Lehre von der privilegierten Rationalität der Wissenschaft zeigt nur, daß es längst über-

fällig ist, ebenfalls in der Wissenschaftssoziologie an das Konzept der »bounded rationality« von Herbert Simon anzuknüpfen (1945; Giere 1988), wie es sich für die Analyse des professionellen Handelns seit geraumer Zeit bewährt hat. Auch die Wissenschaft muß angesichts der überwältigenden Komplexität und Ungewißheit, mit der sie konfrontiert ist, auf befriedigende Erklärungen zurückgreifen. Sie betreibt »satisficing« und ihr Wissen ist durchaus kontingent, aber nicht der völligen Beliebigkeit preisgegeben.

Auf ein solches Modell der eingeschränkten Rationalität des Forschungshandelns steuert neuerdings auch eine Art Mertonsche Gegenbewegung zum konstruktivistischen Ansatz zu, die diesem relativistischen Programm empirische Beispiele der desinteressierten Wahrheitsuche unter Wissenschaftlern entgegenhält (Rudwick 1985; Giere 1988; Cole 1992). Mit ihr formiert sich derzeit eine wissenschaftssoziologische Position, die der Kritik des Konstruktivismus am Postulat vom epistemischen Sonderstatus der Wissenschaft im Grundsatz folgt, aber an einem Modell des Forschungshandelns als Problemlösungshandeln festhält. Diese neue Position konvergiert in jüngerer Zeit zudem über weite Strecken mit einem Teil der konstruktivistischen Literatur, der das Hyper-Kontingenztheorem dieses Ansatzes ebenfalls zu überwinden sucht und das Forschungshandeln als Reduktion von Ungewißheit konzipiert (Hacking 1983, 1992; Gooding 1992; Pickering 1984, 1989; Pickering/Stephanides 1992; Fujimura 1992; Star 1983, 1986, 1989). Diesem Teil der konstruktivistischen Literatur zufolge ist in der Regel dann mit der »Schließung« von wissenschaftlichen Fakten und Theorien zu rechnen, wenn sie Phänomene befriedigend genau beschreiben und insbesondere erfolgreiches technisches Handeln ermöglichen. Als eine der wenigen empirischen Studien, die in diesem Zusammenhang systematisch staatliche Akteure in die Untersuchung einbeziehen, kommt die Arbeit von Fujimura (1992) zu dem Ergebnis, daß sich forschungspolitische Netzwerke zwischen der Wissenschaft, Politik und Wirtschaft dann stabilisieren, wenn sich gewissermaßen robuste Standardpakete von Theorien und Methoden schnüren lassen, die es den beteiligten Akteuren erlauben, Probleme in befriedigender Weise zu lösen. In dem Maße, wie dies gelingt, werden erfolgreiche Problemlösungen stabilisierend auf die theoretischen und methodischen Standards zurückwirken und ihre Faktizität steigern.

Vor diesem Hintergrund kann nun auch deutlich werden, daß das, was im Kuhnschen Deutungsrahmen als »Normalwissenschaft« erschien und die Bielefelder Studien als »Finalisierung« identifiziert hatten, nicht auf kognitiver »Reife« basierte, sondern auf einer erfolgreichen Reduktion von kognitiver Ungewißheit auf befriedigende und hinreichend robuste Sets von Theo-

remen und Methoden. Bei solchen Sets handelt es sich durchaus um »gesichertes Wissen« im Sinne des Begriffs von Merton (1987), dies aber nicht als »sichere Wahrheiten«, sondern als »funktionierende Kausalitäten« (Japp 1997: 305) und reproduzierbare Ergebnisse, die eine Standardisierung der Forschungsmethoden und Stabilisierung der Forschungsziele erlauben.

In dieser Fassung des Konzepts erscheinen kognitive Strukturen auch nicht mehr als die unabhängigen und institutionelle Strukturen als die abhängigen Variablen wie noch in der Kuhnschen Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung, sondern fungieren als unabhängige und als abhängige Variablen zugleich. So kann die Stabilisierung eines Forschungsfeldes zur »Normalwissenschaft« sowohl durch konvergierende Befunde oder Entdeckungen induziert werden, die eine »Schließung« der theoretischen Debatte erlauben, als auch durch institutionelle Restriktionen oder forschungspolitische Vorgaben, die das Forschungshandeln auf bestimmte Ziele und Methoden festlegen und bündeln und damit zugleich die Chancen begrenzen, alternative Fragen und Antworten zu entwickeln. Beide Prozesse können sich wiederum wechselseitig in zirkulären und rekursiven Schleifen stabilisieren, in denen kognitive Standards institutionelle Verfestigungen begünstigen, die ihrerseits auf die kognitive Entwicklung eines Feldes zurückwirken.

Im Anschluß an die Studie von Jerome Ravetz zur »Krise der Wissenschaft« (1973) hat Richard Whitley¹ diese interaktiven Prozesse der wechselseitigen Stabilisierung von kognitiven und institutionellen Variablen erstmals systematisch zu fassen versucht und dazu die Organisationssoziologie gewissermaßen als Hilfswissenschaft der Wissenschaftssoziologie herangezogen. In »The Intellectual and Social Organization of the Sciences« (Whitley 1984) faßt er die Wissenschaft als ein soziales Handlungssystem, das an Innovation ausgerichtet ist und Prämien auf innovative Beiträge aussetzt. Aber die Wissenschaft muß auch organisiert werden. Seit dem Ende des neunzehnten Jahrhunderts ist sie nicht mehr eine Angelegenheit von nur lose untereinander verbundenen »Amateuren«, sondern hat sich zu einem professionellen und arbeitsteiligen Unternehmen entwickelt, das der Koordination und Kontrolle bedarf und bei dem es gilt, Prioritäten zu setzen, die Verteilung von Ressourcen zu regeln, Aktivitäten aufeinander abzustimmen, formale Qualifikationen zu vermitteln und Karrierewege zu institutionalisieren. Diese organisatorischen Anforderungen bilden gewissermaßen ein konservatives Gegengewicht zur Orientierung der Wissenschaft an intellektuel-

1 Whitley (1984); vgl. auch Fuchs (1986), Fuchs/Turner (1986), Fuchs (1992), Hasse (1995).

len Innovationen. Sie wirken sich restringierend auf die kognitive Dynamik der Wissenschaft aus, und die kognitiven Strukturen unterschiedlicher Forschungsfelder werden in hohem Maße mit ihren jeweiligen organisatorischen Strukturen kovariieren. So wird ein hierarchisch koordiniertes Forschungsfach stabilere Forschungsziele aufweisen, stärker aufeinander abgestimmte Forschungsstrategien verfolgen und in größerem Maße standardisiertes Wissen produzieren, als ein kompetitiv strukturiertes Feld, das eher zu kognitivem Pluralismus neigt. Welche institutionellen Prinzipien und Koordinationsformen sich auf einem Feld im einzelnen durchsetzen ist aber wiederum hoch kontingent und hängt wie etwa die polyzentrische Struktur der deutschen Psychologie um die Jahrhundertwende von »historischen Zufällen« ab (Whitley 1984: 93). In anderen Fächern wie zum Beispiel der Partikelphysik wirken sich technische Großanlagen und die institutionellen Regelungen des Zugangs zu solchen Maschinen und ihrer Nutzung zentrierend und stabilisierend auf die kognitive Dynamik der Forschung aus (Knorr-Cetina 1995b). Und in gleicher Weise können dies auch staatliche Forschungsprogramme und politische Zielvorgaben tun. So wird vor allem das Modell der »big science« mit einer Zentralisierung der Kontrolle über die Produktionsmittel des wissenschaftlichen Wissens einhergehen und die kognitive Dynamik eines Feldes damit in restriktiver Weise beeinflussen (Whitley 1984: 108).

Doch diesen institutionellen Einflußfaktoren auf die kognitive Entwicklung der Wissenschaft sind auch Grenzen gesetzt. Die Formen der sozialen Koordination der Forschung sind zwar hoch, aber nicht vollkommen kontingent, sondern hängen ihrerseits von der Standardisierbarkeit des Wissens und damit von kognitiven Bedingungen ab. Zwischen den institutionellen und kognitiven Einflußfaktoren auf die Entwicklung der Wissenschaft besteht eine »essential tension« (ebd.: 13), die eine Kombination von hierarchischer Kontrolle und einer geringen Standardisierbarkeit des Forschungsprozesses unwahrscheinlich macht. Wenn, um mit Kuhn zu sprechen, die wissenschaftlichen »Anomalien« zunehmen, ist es wahrscheinlich, daß die kognitive Unordnung zugleich in soziale Unordnung umschlägt. Auf einem Feld, auf dem sich keine befriedigenden Standards einstellen, die Forschungsstrategien zu nicht voraussagbaren und nicht stabil replizierbaren Resultaten führen, werden lokale und idiosynkratische Lösungsversuche zunehmen. Als Folge werden die Chancen sinken, das Feld hierarchisch zu koordinieren, und es werden sich kompetitive Beziehungen herausbilden. Damit sind auf Gebieten mit gering standardisierbarem Wissen auch staatlichen Vorgaben Grenzen gesetzt. Solche Vorgaben können ein Fach nur vor-

übergehend oder unter mehr oder minder zufälligen Bedingungen stabilisieren. Insbesondere wird sich »big science« hier als eine riskante Strategie mit ungewissen Resultaten und unvorhersehbaren Folgen erweisen.

Bei aller Kontingenz der wissenschaftlichen Entwicklung lassen sich damit dennoch deutliche Muster in der Interaktion von institutionellen und kognitiven Variablen identifizieren. Diese Muster sind in der Organisationssoziologie seit langem bekannt, und es dürfte den Blick der Wissenschaftssoziologie für Unterschiede in der Funktionsweise unterschiedlicher Forschungsfelder und in ihren Interaktionsformen mit der politischen und wirtschaftlichen Umwelt erheblich schärfen, wenn sie Anleihen bei dieser Nachbardisziplin macht. Whitley schlägt in diesem Kontext ein einfaches organisationssoziologisches Grundmodell vor, in dem die sozialen Organisationsformen unterschiedlicher Forschungsfelder vom Grad der Interdependenz der Forschungsaktivitäten und der Ungewißheit der Forschungsaufgaben abhängen. Wo der Grad der wechselseitigen Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten hoch ist und die Ungewißheit der Forschungsaufgaben gering, wird sich standardisiertes Wissen und damit ebenso eine stabile soziale Ordnung herausbilden können, die ihrerseits die kognitive Struktur des Feldes festigt. Wenn dagegen der Grad der wechselseitigen Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten sinkt und die Ungewißheit der Forschungsaufgaben steigt, werden mit der abnehmenden Standardisierbarkeit des Forschungsprozesses auch die Mittel der hierarchischen Koordination versagen und sich kompetitive Beziehungen auf dem Forschungsfeld herausbilden, die das Maß der kognitiven Ungewißheit noch steigern.

Während ein Forschungsfeld im ersten Fall in starkem Maße hierarchisch strukturiert sein und über eine kollektiv handlungsfähige Führungselite verfügen wird, wird es im zweiten Fall mit hoher Wahrscheinlichkeit eine pluralistische Struktur aufweisen. Mit dieser Varianz in der internen Organisierbarkeit von Forschungsfeldern sind auch die Chancen nicht gleich verteilt, stabile Netzwerkbeziehungen mit der Politik und Wirtschaft eingehen zu können. Wo sich die Forschungsaktivitäten auf klare Ziele bündeln und die Forschungsaufgaben gut vorhersehen lassen, wird die Handlungs- und Entscheidungssicherheit der staatlichen Forschungspolitik hoch sein. Mangelt es dagegen an wissenschaftlichem Konsens über die Forschungsziele und sind die Ergebnisse des Forschungshandelns ungewiß, ist zugleich die Rationalität der steuerungspolitischen Akteure stark eingeschränkt und ihre Entscheidungssicherheit gering.

Dieses Modell zieht in vieler Hinsicht berechtigte Kritik auf sich. Sein einfacher Aufbau dürfte viele empirische Aspekte, die für den Vergleich der

sozialen Organisations- und Koordinationsformen unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen relevant sind, kaum abdecken. Dies gilt ebenso und vor allem für die Kernphysik und die Informatik als die beiden hier untersuchten Vergleichsfälle. Gerade diese Fälle zeigen, daß die beiden Grundvariablen des Modells einer weiteren Differenzierung bedürfen. Doch selbst wenn man seine analytischen Dimensionen stärker differenziert, bleibt es überaus »parsimonious« und verfügt nicht über die »requisite variety«, die erforderlich ist, um die empirische Komplexität der Interaktionsprozesse zwischen den institutionellen und kognitiven Einflußfaktoren auf die Entwicklung der Wissenschaft auch nur annähernd zu erfassen. Zudem beschreibt das Modell keine eng gekoppelten, ursächlichen Zusammenhänge, sondern lediglich funktionale und relativ locker zusammenhängende Typen und Muster von Beziehungen. Und es sagt ebenfalls nichts darüber aus, welche Ziele sich die staatliche Forschungspolitik zueigen macht. Dies hängt generell von kontingenten Prozessen ab, die den analytischen Rahmen sowohl der Wissenschafts-, wie der Organisationssoziologie sprengen. Das Modell läßt nur Aussagen darüber zu, ob in einem gegebenen Fall »günstige« oder »ungünstige« Bedingungen für die Realisierung politischer Ziele bestehen und die organisatorischen Mittel der staatlichen Politik ihren Zwecken mehr oder minder angemessen sind. Es kann also allenfalls die notwendigen, nicht jedoch die hinreichenden Voraussetzungen für die Realisierung politischer Programme identifizieren.

Trotz all seiner Mängel erweist es sich dennoch als tragfähig genug, um erste Schritte in die Richtung einer Neubelebung der forschungspolitisch orientierten Diskussion in der Wissenschaftssoziologie zu wagen. Wo die Kuhnsche Theorie versagt und der Konstruktivismus nur Kontingenz feststellt, gibt das Modell ein analytisches Raster ab, das sich dazu eignet, Ordnung in die Komplexität des empirischen Materials zu bringen, und damit immerhin auf eine »zutreffenden Vereinfachung« hinausläuft. Die empirisch konstatierbaren Muster in der Entwicklung der Kernphysik und Informatik decken sich in hohem Maße mit den dort beschriebenen Zusammenhängen. Beide Disziplinen lassen sich im Lichte dieses Schemas geradezu als Gegenpole auf einem Kontinuum von Aufgabeninterdependenz und -ungewißheit fassen. Ihre Modellierung als solchermaßen entgegengesetzte Pole kann auch eine Antwort auf die Frage liefern, warum sich die kerntechnische Forschung in erfolgreicher Weise als Großforschung organisieren ließ und zum Vorbild der staatlichen Forschungsorganisation schlechthin werden konnte, während die informatische Großforschung stets Probleme aufwarf.

Die Kerntechnik ging keineswegs aus einer »reifen«, paradigmatisch konsolidierten Theorie hervor. Sie basierte vielmehr auf einem robusten Standardset von reaktorphysikalischen Theoremen und Methoden, das wissenschaftlich wenig befriedigend war, das allerdings erfolgreiches technisches Handeln zuließ und es der Gemeinschaft der Nuklearphysiker nach dem Zweiten Weltkrieg im Zuge eines »Technology-push-Effekts« ermöglichte, zu einer hoch kohärenten forschungspolitischen Führungselite aufzusteigen, die über Jahrzehnte das Kompetenzmonopol auf dem Gebiet der Energiepolitik besaß. Unter der lange Zeit gegebenen Voraussetzung eines gesellschaftspolitischen Konsenses über die friedliche Nutzung der Kernenergie verfügte diese Gemeinschaft über ein ungewöhnlich hohes Maß an Handlungssicherheit, sowohl was die Auswahl der Forschungsziele, als auch deren Realisierung betraf. Bestand anfänglich hohe Unsicherheit über die Auswahl der ersten Generation von Reaktoren, so reduzierten sich beim Übergang zur zweiten Generation diese Ziele letztlich auf genau zwei Typen von Reaktoren, deren Entwicklung dann in einem »vertikal« gerichteten Transferprozeß von der kernphysikalischen Grundlagenforschung zur Anwendungsforschung erfolgen konnte. Auf der Basis der hohen Handlungssicherheit, die in der kerntechnischen Forschung herrschte, konnte sich auch ein stabiles korporatives Koordinationsnetzwerk zwischen der Wissenschaft, Wirtschaft und Politik herausbilden, in dem sich die Forschungsziele und die Verteilung der Aufgaben auf dem Wege von Verhandlungen festlegen ließen. Innerhalb dieses Koordinationsnetzwerks nahm die staatliche Forschungspolitik nach einer anfänglichen Phase der Ungewißheit die Führungsrolle ein, indem es ihr gelang, die kerntechnische Großforschung in stabiler Weise genau an zwei »großen Aufgaben« zu orientieren und in gleichermaßen stabiler Weise die Forschungs- und Transferaktivitäten dieser Einrichtungen zu koordinieren. Obwohl mit der Kuhnschen Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung seine Funktionsbedingungen fehlinterpretiert wurden, war das Modell der Großforschung dem speziellen Fall der Kerntechnik damit dennoch angemessen.

Auch die Entstehung der Informatik und Informationstechnik ist insbesondere von den Bielefelder Studien ganz im Sinne der Kuhnschen Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung als eine Phasenabfolge von paradigmatischen Reifestadien gedeutet worden (vgl. Mainzer 1979). Empirisch läßt sich diese Deutung indes nicht aufrechterhalten. Die Informationstechnik ist nicht aus der Informatik, sondern die Informatik aus der Informationstechnik hervorgegangen. Sie ist im Zuge eines »Demand-pull-Effekts« entstanden, der von den wachsenden Komplexitätsproblemen der Informationstech-

nik ausging, die mit Methoden der wissenschaftlichen Programmierung gelöst werden sollten. Aber auch dann hat die Informatik weder ein Stadium der paradigmatischen »Reife« erlangt, noch wie die Kernphysik ihren Forschungsgegenstand auf ein basales Standardset von befriedigenden Theoremen und Methoden reduzieren können. Die Informatik verfügte, wenn überhaupt, nur für kurze Zeit über Forschungsziele und theoretisch-methodische Konzepte, die zu der Hoffnung Anlaß gaben, daß sie die technische Praxis wissenschaftlich anzuleiten vermochte. Tatsächlich jedoch ist die technische Praxis dem wissenschaftlichen Wissen über die Konstruktionsprinzipien von informationsverarbeitenden Maschinen weit vorausgelaufen, während auch die Informatik selbst eine überschießende Vielfalt von theoretischen und methodischen Deutungen des Computers hervorgebracht hat. Beides hat zur Folge, daß innerhalb der informatischen Forschung sowohl große Ungewißheit im Hinblick auf die Auswahl der Ziele, als auch auf ihre Realisierung besteht, während sich die Informationstechnik selbst weitgehend unabhängig von der Wissenschaft durch »bricolage« und experimentelles Konstruieren weiterentwickelt und dabei beständig »Bottom-up-Innovationen« hervorbringt und ungesichertes Neuland betritt. Dementsprechend gibt es auch keine stabilen »vertikalen« Transferbeziehungen zwischen der informatischen Grundlagenforschung und der Informationstechnik. Vielmehr kommt mit dem raschen Vordringen dieser Technik in immer neue Anwendungsgebiete »horizontalen« und interdisziplinären Kooperationsformen auf diesem Feld eine ebenfalls rasch wachsende Bedeutung zu. Die Entwicklung der Informationstechnik wird weithin nicht durch Verhandlungen und Konsensbildung in korporativen Netzwerken, sondern primär durch evolutionäre und marktformige Prozesse koordiniert.

Für die staatliche Forschungspolitik lief dies stets auf eine hohe »Verwendungsunsicherheit« für die informatische Großforschung hinaus, der es in ihrer Entwicklungsgeschichte nie gelungen ist, stabile Transferbeziehungen zu ihren Adressaten in der technischen Praxis aufzubauen, und die sich anders als ihre Vorbilder in der Kernphysik nie an einer »großen« und identitätsstiftenden Aufgabe orientieren konnte. Es ist nicht allzu schwer, auf dem Gebiet der Informationstechnik große Projekte zu definieren; diese Technik ist im Zuge militärischer und kommerzieller Großprojekte entstanden und entwickelt sich auf der Basis solcher Projekte fort. Aber es ist schwierig, im Bereich der Informationsverarbeitung großforschungsspezifische Ziele zu identifizieren und festzulegen, die nicht nur rein technischer Natur sind, mit denen vielmehr gesichertes Grundlagenwissen in Anwendungswissen überführt wird und die von der Industrie nicht selbst verwirklicht werden könnten.

Dieses Dilemma tritt um so deutlicher hervor, wenn man die Entwicklung und Funktionsweise der informatischen Großforschung mit der Entwicklung und Funktionsweise der informationstechnischen Institute der Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) vergleicht. Im Falle dieser Institute beschränkt sich die staatliche Forschungspolitik auf eine Kontextsteuerung (Teubner/Willke 1984; Hohn/Schimank 1990), die darauf verzichtet, die Forschungsziele hierarchisch zu bestimmen und Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten »top down« zu koordinieren. Sie werden nach dem Modell der anreizfinanzierten Vertragsforschung gefördert, das sie dazu in die Lage versetzt, sich »bottom up« selbst zu koordinieren und ihre Ziele im Rahmen einer marktorientierten Vertragsforschung selbst zu wählen. Die Vorteile, die sich mit einer solchen Politik des »enabling« verbinden, zeigen deutlich, daß »organization matters« und die Performanz von Forschungsorganisationen entscheidend von ihrem institutionellen Design abhängen. Während die Mittel der hierarchischen Koordination im Fall der informatischen Großforschung weitgehend versagen, haben die informationstechnischen Institute der Fraunhofer-Gesellschaft seit langer Zeit einen stabilen Erfolgskurs einschlagen können. Das Modell der Großforschung bewährt sich nur in relativ einfach strukturierten Umwelten und erweist sich dort als effizient, wo sich die Ziele und Mittel stabil bestimmen lassen. Mit einer so komplexen und dynamischen Welt wie der Informatik und Informationstechnik ist dieses Modell in sehr viel geringerem Maße kompatibel.

Vor dem Hintergrund dieser argumentativen Ziele lassen sich nun auch der Aufbau und der Plan des vorliegenden Buchs darlegen. In den folgenden Abschnitten dieses ersten Kapitels wird es darum gehen, ausgehend von der zunächst rein internalistischen Position des frühen Mertonschen Mainstreams die Entwicklung der steuerungstheoretischen Debatte in der Wissenschaftssoziologie nachzuzeichnen und die Gründe für ihr Scheitern im Rahmen des Kuhnschen Deutungsschemas zu erörtern. Dem schließt sich eine kritisch-konstruktive Auseinandersetzung mit den Science and Technology Studies an, die den Nachweis zu erbringen sucht, daß sich deren Befunde für eine Erneuerung dieser steuerungstheoretischen Diskussion und eine positive Theorie der sozialen Organisation der Wissenschaft und ihrer Interaktion mit der Politik und Wirtschaft durchaus fruchtbar machen lassen, wenn man sie im Sinne einer eingeschränkten Rationalität des sich an befriedigenden Standards orientierenden Forschungshandelns deutet. Die daran anschließenden empirischen Kapitel der Arbeit verfolgen dementsprechend ein doppeltes Ziel. Sie richten sich einerseits gegen die Kuhnsche Theorie der wis-

senschaftlichen Entwicklung und andererseits gegen das hyper-kontigente Bild des wissenschaftlichen Wissens, das der Konstruktivismus zeichnet.

Das zweite Kapitel befaßt sich vor diesem Hintergrund kritisch mit der Kuhnschen Deutung der Entwicklung der Kernphysik als einer Abfolge paradigmatischer Entwicklungsphasen und beschreibt die Entdeckung und Erklärung der Kernspaltung als einen Prozeß der zirkulären Anpassung von experimentellen Befunden und Theoriebausteinen, der zur »Schließung« einer robusten Standardtheorie dieses Phänomens führte. Im Anschluß daran zeigt das dritte Kapitel auf, daß und warum die Kernphysik auf der Basis dieser robusten Standardtheorie und eines begrenzten Sets von technischen Zielen dem Modell der Großforschung mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe und der Kernforschungsanlage Jülich in der Bundesrepublik erfolgreich den Weg bahnen konnte.

Auch die Entstehung des Computers und die Entwicklung der Informatik und Informationstechnik ist in der wissenschaftssoziologisch-steuerungstheoretischen Debatte der siebziger und frühen achtziger Jahre im Rahmen des Kuhnschen Modells (Mainzer 1979) gedeutet worden. Die Kapitel vier, fünf und sechs argumentieren dagegen, daß sich diese Interpretation empirisch weder für die Genese noch für die spätere Entwicklung dieses Forschungsfeldes aufrechterhalten läßt. Der Computer war wie das Phänomen der Kernspaltung eine unerwartete Entdeckung und ist im Zuge zirkulärer experimenteller und theoretischer Anpassungen entstanden, und anders als dies im Kuhnschen Deutungsschema erscheint, haben es die von Beginn an hohe theoretische und methodische Multivalenz und vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten dieser Maschine nie erlaubt, die Standards der Informationstechnik von »innen nach außen« festzulegen. Diese Technik wird vielmehr wie die Informatik selbst weitgehend von »außen nach innen« bestimmt. Wie dann im siebenten Kapitel im einzelnen zu zeigen sein wird, liefert dies zugleich eine Erklärung dafür, daß die Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung bislang keinen erfolgreichen Entwicklungspfad eingeschlagen hat. Dieses Kapitel kontrastiert darüberhinaus auch die Entwicklung der informatischen Großforschung mit der Entwicklung der informationstechnischen Institute der Fraunhofer-Gesellschaft als Modell der anreizfinanzierten Kontextsteuerung. Das Fazit dieser Arbeit greift vor dem Hintergrund der konstatierbaren empirischen Muster in der Entwicklung der Kerntechnik und der Informationsverarbeitung dann schließlich die theoretische Argumentation des Einleitungskapitels resümierend auf.

1.2 Die Rolle der Forschungspolitik in der traditionellen und in der Kuhn'schen Wissenschaftssoziologie

In der traditionellen Wissenschaftssoziologie kam das Problem der Forschungsorganisation ursprünglich nicht einmal vor, geschweige denn, daß in deren Deutungsrahmen externe soziale Faktoren die Entwicklung der Wissenschaft hätten beeinflussen können. Die soziale Organisation der Wissenschaft war eine abhängige Größe ihrer kognitiven Entwicklung und ihre kognitive Entwicklung der soziologischen Analyse nicht zugänglich. Seit Karl Mannheims Werk »Ideologie und Utopie« (1929) galten die Naturwissenschaften und die Mathematik als ein gesonderter kognitiver und epistemisch privilegierter Bereich. Mannheim hat dort zwar die Lehre von der sogenannten Seinsverbundenheit des Wissens entwickelt, derzufolge sowohl die Entstehung als auch die Geltung von Wissen durch soziale Faktoren beeinflußt wird, diese Lehre aber strikt auf Alltagstheorien beziehungsweise auf die »weichen« Sozial- und Humanwissenschaften beschränkt und die Naturwissenschaften und die Mathematik als »harte« Disziplinen hiervon explizit ausgenommen. Das mathematisch-naturwissenschaftliche Wissen war einheitliches Wissen, das mit der Hilfe distinkter Methoden gewonnen wurde und einer universellen »logic of justification« unterlag, die seine Wahrheit und stetige kumulative Erkenntnisfortschritte garantierten.² Dementsprechend galt die Produktion dieses Wissens als ein rationaler epistemologischer Prozeß, dessen soziale Organisation keine weiteren Probleme aufwarf.

Mannheims Lehre vom epistemologischen Sonderstatus der Naturwissenschaften und der Mathematik führte dazu, daß wissenschaftliches Wissen bis weit in die siebziger Jahre hinein weder zum Gegenstand der Wissenssoziologie noch der Wissenschaftssoziologie wurde. Sie legte vielmehr den Grundstein für eine jahrzehntelange Trennung zwischen beiden Gebieten, bei der die Wissenssoziologie die sozialen Determinanten politischer Theorien und alltagstheoretischer Deutungen untersuchte, während sich die Wissenschaftssoziologie auf das Studium der institutionellen Struktur des Wissenschaftssystems beschränkte.

2 So im übrigen auch Durkheim, der ansonsten aber sogar die soziale Bedingtheit und Variabilität epistemologischer Grundkategorien wie Raum, Zeit und Kausalität behauptete (Hohn 1984: 5).

Robert Merton und der von ihm begründete strukturfunktionalistische Mainstream, der die Wissenschaftssoziologie der fünfziger und sechziger Jahre beherrschte, teilten Mannheims Auffassung, daß sich die Wissenschaft als kognitives System der soziologischen Analyse entzog. In seinem schulbildenden Werk »Science, Technology, and the Society in Seventeenth-Century England« (1970 [1938]) beschrieb Merton die Entstehung der modernen Wissenschaft als Ausdifferenzierung und Institutionalisierung eines eigenständigen gesellschaftlichen Systems, in dem die Suche nach Wahrheit als Selbstzweck betrieben wurde und das auf den Normen von Universalismus, Kommunismus, Desinteressiertheit und organisiertem Skeptizismus basierte.³ Diese Normen stellten die Objektivität des wissenschaftlichen Wissens sicher und schützten das Wissenschaftssystem gewissermaßen vor einer Korruption durch soziale, politische und wirtschaftliche Interessen.

Für Merton folgte daraus, daß sich die Wissenschaftssoziologie darauf zu beschränken hatte, die institutionellen Rahmenbedingungen zu untersuchen, die die Ausdifferenzierung und Verselbständigung der Wissenschaft zu einem autonomen kognitiven System ermöglichten. In »Science, Technology, and the Society in Seventeenth-Century England« stellte er fest: »Specific discoveries and inventions belong to the internal history of science and are largely independent of factors other than the purely scientific« (Merton 1970: 75). Auch in seinem späteren Werk »Social Theory and Social Structure« argumentierte er, daß wissenschaftliche Kontroversen »are settled by the universalistic facts of nature which are consonant with one and not with another theory« (Merton 1957: 554).⁴ Die Wissenschaftssoziologie blieb damit lange Zeit einem »black boxism« (Whitley 1972a) verhaftet, der theoretische Kontroversen, Brüche und Diskontinuitäten in der Entwicklung des wissenschaftlichen Wissens nicht zur Kenntnis nahm und die Wissenschaft als homogenes Gebilde behandelte.⁵

-
- 3 Arbeiten wie die von Pierre Duhem (1906), Ludwik Fleck (1935) oder Michael Polanyi (1962), die allesamt die Bedeutung kollektiver Denkstile und »tacit skills« für die Entwicklung des wissenschaftlichen Wissens betonten, sind innerhalb des Mertonschen Ansatzes nicht zur Kenntnis genommen worden.
 - 4 Joseph Ben-David teilte diese Auffassung Mertons. In seiner Monographie »The Scientists Role in Society«, das neben Mertons Arbeiten zu den Pionierwerken der Wissenschaftssoziologie zählt, kam er zu dem Ergebnis: »The possibilities for either an interactional or institutional sociology of the conceptual and theoretical contents of science are extremely limited« (Ben-David 1971: 13–14).
 - 5 Die soziologische Systemtheorie hat die strukturfunktionalistische Wissenschaftssoziologie dann nochmals vereinfacht und radikalisiert. Sie behandelt die Wissenschaft als ein homogenes und ausschließlich an Wahrheit orientiertes soziales System. Niklas Luhmann

In diese Situation kam erst Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre mit der von Thomas Kuhn und seiner Arbeit über »Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen« (1969) ausgelösten neuen erkenntnistheoretischen Debatte Bewegung. Kuhns Werk beschrieb die Entwicklung der Wissenschaft als eine Abfolge konkurrierender »Paradigmata«⁶ und löste jetzt eine »anti-positivistische Wende« (Heintz 1993b) in der Wissenschaftssoziologie aus. Dabei wurde es vor allem von den sich mehrenden kritischen Stimmen auf breiter Basis aufgegriffen, die sich angesichts der zunehmenden Bedeutung und des rapiden Wachstums der staatlich organisierten und industriellen Forschung für eine Erneuerung der Wissenschaftssoziologie aussprachen. In allen industrialisierten Ländern hatte sich nach dem Zweiten Weltkrieg eine eigenständige staatliche Forschungspolitik herausgebildet, die der Wissenschaft nicht mehr nur als Mäzen gegenübertrat, sondern sie zunehmend als wirtschaftliche Ressource und Produktivkraft behandelte. Diese empirischen Entwicklungen führten vor allem in Europa zu einem wachsenden Unbehagen am Mertonschen Mainstream, der die Existenz der »science policy« und staatlich organisierten »big science« scheinbar ignorierte. Der staatlichen Forschungspolitik sollte eine neue Wissenschaftswissenschaft zur Seite gestellt werden, die eine »geplante Forschung« (van den Daele/Krohn/Weingart 1979) ermöglichte.

Diese neue Wissenschaftssoziologie glaubte, für ihre Zwecke auf dem Kuhnschen Ansatz aufbauen zu können, und sah in ihm die theoretische Grundlage für eine rationale »science policy« und politische Steuerung der Wissenschaft. In ihren Augen lieferte Kuhns Theorie den Nachweis, daß die Wissenschaft in sehr viel stärkerem Maße als bislang angenommen offen für soziale und politische Einflüsse war und sich damit auch grundsätzlich auf gesellschaftliche Probleme orientieren ließ. In seinem Werk beschrieb Kuhn die Entwicklung der Wissenschaft als eine Geschichte von Brüchen und

entwickelte im Anschluß an Merton zunächst eine Theorie der wissenschaftlichen Selbststeuerung (Luhmann 1970), die er später durch die Theorie eines selbstreferentiellen und autopoietischen Systems ersetzte (Luhmann 1986: 150–166, 1990).

- 6 Die Originalausgabe erschien 1962. Der zweiten Ausgabe von 1969 fügte Kuhn ein »Postskriptum – 1969« mit Revisionen zum ursprünglichen Begriff des Paradigmas an. Dennoch blieb dieser Begriff schillernd. Zum einen bezeichnet er eine »Konstellation von Meinungen, Werten, Methoden etc., die von den Mitgliedern einer gegebenen Gemeinschaft geteilt werden« und zum anderen »konkrete Problemlösungen, die, als Vorbilder oder Beispiele gebraucht, explizite Regeln als Basis für die Lösung der übrigen Probleme der »normalen Wissenschaft« ersetzen können« (Kuhn 1976: 168; zur Diskussion der unterschiedlichen Verwendungsweisen des Kuhnschen Paradigmbegriffs vgl. Masterman 1970 und Hargens 1975).

Diskontinuitäten, nahm aber zugleich an, daß wissenschaftliche Disziplinen stets verschiedene Phasen oder »Reifestadien« durchlaufen.⁷ Kuhn hatte dieses Phasenmodell seinerseits unter anderem am Beispiel der Kernphysik entwickelt, die für ihn ein allgemeines Entwicklungsschema der modernen Wissenschaft repräsentierte. Seiner Theorie zufolge lassen sich in der Entwicklung einer Disziplin immer drei Phasen unterscheiden: eine prä-paradigmatische oder explorative Phase, in der innerhalb des Feldes Uneinigkeit über die zentralen Forschungsfragen und theoretischen Konzepte besteht; eine paradigmatische Phase, in der sich in der Gemeinschaft unter einem kognitiven Leitbild Konsens über die Forschungsziele und Forschungsmethoden herausbildet; und eine post-paradigmatische Phase, in der die Forschung im wesentlichen noch verbliebene Rätsel löst, doch keine basalen Innovationen mehr hervorbringt. In dieser dritten Phase hat das Forschungsfeld als post-paradigmatische Normalwissenschaft dann Anwendungsreife erlangt, öffnet sich für wissenschaftsexterne Zweckorientierungen und wird der politischen Steuerung zugänglich (vgl. Kuhn 1976: 25–56, 187–192).

Im Anschluß an die Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung entstanden zu Beginn der siebziger Jahre eine Reihe von Untersuchungen, die der Frage nach dem »Wechselspiel von sozialen und intellektuellen Faktoren« (Edge/Mulkay 1975: 197) nachgingen und sein Phasenmodell auf die Entstehung und Entwicklung neuer wissenschaftlicher Spezialgebiete anzuwenden suchten. Die Ergebnisse dieser Studien boten jedoch kein einheitliches Bild und ließen statt dessen erste grundlegende Zweifel an der Gültigkeit des Kuhnschen Modells aufkommen. Edge und Mulkay (1975; Mulkay 1975) unterzogen die Untersuchungen einem ausführlichen Vergleich, der zum Ziel hatte, »Ähnlichkeiten« (Edge/Mulkay 1975: 197) bei der Theorie herauszuarbeiten. Sie stellten jedoch fest, daß deren empirischen Befunde kaum dem erwarteten Muster entsprachen und die Ergebnisse der Fallstudien eine »Herausforderung an Kuhns Hauptthese« darstellten (ebd.: 220).

Die Entstehung der untersuchten neuen Forschungsgebiete beruhte mit einiger Wahrscheinlichkeit nicht auf endogenem intellektuellem Wandel, sondern ging vielmehr auf unvorhergesehene Entdeckungen, laterale Prozesse zwischen benachbarten Gebieten und unerwartete Verzweigungen von

7 Er blieb damit einer durch und durch internalistischen Sichtweise verhaftet und hatte ausschließlich die innere kognitive Dynamik einzelner Disziplinen im Auge. Selbst interdisziplinäre Forschungsfelder lagen außerhalb seines Blickfeldes. Wissenschaftliche Revolutionen sind in der Kuhnschen Theorie endogen erzeugte kognitive Umbrüche, die sich letztlich als Generationskonflikte unter Forschern abspielen (Krohn 1989: 18–19, 27–28).

Forschungsrichtungen zurück. Zudem hielten die untersuchten wissenschaftlichen Gemeinschaften in sehr viel geringerem Maße als erwartet an einmal etablierten Weltansichten und Forschungspraktiken fest, als dies die Kuhnsche Theorie nahelegte. Auch die empirisch höchst »flüssigen und amorphen sozialen Beziehungen« (Mulkay 1975: 56) der Forscher entsprachen nicht dem von Kuhn behaupteten Muster stabiler paradigmatischer Gemeinschaften. Alles in allem lief seine Theorie damit auf ein unrealistisch unitarisches Modell der Wissenschaft und das Konzept des Paradigmas auf ein überzogenes »monistisches« (Whitley 1974a: 3) Erklärungsprinzip hinaus.

Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangte ebenfalls die Theorie der »Finalisierung der Wissenschaft«, wie sie am Anfang der siebziger Jahre in Deutschland von der sogenannten Starnberger Gruppe entwickelt wurde.⁸ Ausgangspunkt der Starnberger Gruppe war die explizite steuerungstheoretische Frage nach den Möglichkeiten und Grenzen der staatlichen Intervention in die Forschung und ihrer Orientierung an gesellschaftspolitischen Zielen. Dabei machte sich die Starnberger Gruppe ebenfalls das Kuhnsche Stadien- oder Phasenmodell zu eigen. Dieses Modell schien ihr die Chance zu bieten, interne und externe Bestimmungsgründe der wissenschaftlichen Entwicklung miteinander verbinden zu können, und sich zugleich kritisch von einem wissenschaftssoziologischen Externalismus abzusetzen, der wie etwa Sohn-Rethel (1971) die Entwicklung der Wissenschaft als rein abhängige Größe politischer und ökonomischer Prozesse beschrieb (Krohn 1989: 21–22).

Der Grundgedanke dieser Theorie bestand darin, daß sich die Forschung in der explorativen und paradigmatischen Phase nach innen orientiere und »Resistenz« gegenüber staatlichen Steuerungsversuchen aufweise. In diesen beiden Phasen verhinderten kognitive Defizite ihre Orientierung an externen Zwecken. Dies ändere sich erst, wenn sie in der dritten, post-paradigmatischen Phase theoretische Reife erlangt habe und über ein universelles und stabiles Paradigma ihres Gegenstandsbereichs verfüge, mit dem alle Probleme im Prinzip gelöst seien. In dieser Phase werde sie »rezeptiv« für außerwissenschaftliche Einflüsse und könne externe, gesellschaftliche, politische und wirtschaftliche Ziele internalisieren (Böhme/van den Daele/Krohn 1973: 134–135).

8 Diese Theorie löste eine heftige Diskussion und heute kaum noch nachvollziehbar vehemente Kritik aus. Vgl. als die wichtigsten Veröffentlichungen zur Finalisierungstheorie: Böhme/van den Daele/Krohn (1972, 1973, 1974, 1978) und zu ihrer Kritik vor allem Eberlein/Dietrich (1983).

Die empirische Überprüfung des Starnberger Modells durch die Bielefelder Studien zur »Geplanten Forschung« und zahlreiche andere Untersuchungen über den Verlauf und die Auswirkungen forschungspolitischer Programme auf die Entwicklung wissenschaftlicher Disziplinen konnten diese Annahmen nicht bestätigen. Wie bereits die Studien zur Entstehung neuer Spezialgebiete lieferten auch die im Rahmen der Finalisierungstheorie entstandenen empirischen Untersuchungen kein einheitliches Bild und ließen keine systematischen Vergleiche zu. Es zeigte sich vielmehr, daß die »Querverbindungen und Überlagerungen zwischen den Orientierungen nach außen und nach innen zahlreicher und komplexer waren als unterstellt« (Krohn 1989: 23). Hatte die Finalisierungstheorie mit Kuhn angenommen, daß sich die wissenschaftlichen Gemeinschaften in den vortheorietischen Phasen inengeleitet und resistent gegenüber externen Einflüssen verhielten, so ergaben die Fallstudien »eine hohe Durchlässigkeit dieser Gemeinschaften unter allen Entwicklungsbedingungen der Theorien« (ebd.: 23). Vor allem aber förderte die empirische Überprüfung des Starnberger Ansatzes zu Tage, daß »Finalisierung« gerade ihr Gegenteil bewirken, den Konsens zwischen Wissenschaftlern zerstören und eine Pluralisierung der kognitiven Konzepte zur Folge haben kann. Forschungspolitische Versuche, die Wissenschaft auf externe Ziele zu orientieren, können, so Wolfgang Krohns Fazit aus den Starnberger und Bielefelder Studien, »zu neuen fundamentalen und sehr allgemeinen Forschungsfeldern führen, in denen nicht nur Zweckbindungen wieder abgestreift, sondern auch für verlässlich gehaltene Theorien an den Rand gedrängt werden« (ebd.: 27). Damit war deutlich, daß sich das Kuhnsche Modell weder für systematische Vergleiche noch als Grundlage für die politische Forschungsplanung eignete.

Die Verknüpfung des Kuhnschen Modells mit dem Mertonschen Ansatz, wie sie am Anfang der siebziger Jahre von einer Reihe von Studien, die vor allem in den USA entstanden, angestrebt wurde, führte nur scheinbar zu einer komparativen Wissenschaftssoziologie. Da es nach Kuhns Werk über »Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen« nicht mehr möglich war, die Wissenschaft als rein homogenes soziales System zu konzeptualisieren und alle Disziplinen unterschiedslos zu behandeln, suchten diese Studien das Kuhnsche Konzept der paradigmatischen Phasen in den Mertonschen Ansatz zu integrieren und führten jetzt die Unterschiede in den sozialen Organisationsstrukturen wissenschaftlicher Disziplinen auf deren unterschiedliche »Reifegrade« zurück (Beyer/Stevens 1975; Geser 1975; Lodahl/Gordon 1972; Zuckermann/Merton 1971, 1973). Dabei blieben sie aber nach wie vor einem strukturfunktionalistischen »black boxism« verhaftet. Diese Stu-

dien haben nicht den Status des Wissens in den Disziplinen selbst untersucht, sondern bildeten lediglich Ad-hoc-Annahmen über deren jeweilige kognitive Struktur, die sie zur unabhängigen Variable erklärten, während sie ihre soziale Struktur als abhängige Variable betrachteten und somit verglichen, was sie voraussetzten.

So kamen etwa Beyer und Stevens zu dem Fazit:

[Die] dargestellten Daten haben umfassende und beständige Unterschiede zwischen als stark paradigmatisch *betrachteten* wissenschaftlichen Gebieten und als schwach paradigmatisch *betrachteten* Gebieten dokumentiert.

(Beyer/Stevens 1975: 369; Hervorh. d. Verf.)

Das klassische Gegensatzpaar bildete in diesem Zusammenhang immer die Physik als paradigmatisch reifes und sozial wohlgeordnetes Fach und die Soziologie als vor-paradigmatisches und heillos zerstrittenes Forschungsfeld. Merton selbst vermied in diesem Zusammenhang den Begriff des Paradigmas und sprach vom Grad der »Kodifizierung« (Zuckermann/Merton 1971, 1973) des Wissens, ohne freilich über mehr als Ad-hoc-Annahmen über die jeweilige Struktur des Wissens in unterschiedlichen Disziplinen hinauszugelangen.

1.3 Entzauberung und Dekonstruktion der Wissenschaft durch die neue Wissenssoziologie

Die steuerungstheoretische Debatte wurde im Verlauf der achtziger Jahre mehr und mehr von einer epistemologischen Diskussion im Rahmen des sozialkonstruktivistischen Ansatzes abgelöst, der seinerseits eine Erneuerung der Wissenssoziologie zum Ziel hatte.⁹ Dieser Ansatz richtete sich zunächst ebenfalls mit Kuhn gegen den Mertonschen Mainstream und suchte das Mannheimsche Projekt auf das wissenschaftliche Wissen auszuweiten, unterzog dann im Zuge seiner Entwicklung aber auch das Kuhnsche Modell selbst einer radikalen Kritik. Der Laborkonstruktivismus mit den ethnome-

9 Einen Überblick liefern Knorr-Cetina/Mulkay (1983). Die Bezeichnung dieses Ansatzes ist nicht einheitlich und variiert mit jeweiligen Teilströmungen. Der häufig verwandte Begriff *Sociology of Scientific Knowledge* steht dabei primär für die mikrosoziologischen Studien. Ich verwende hier pauschal die breitere Bezeichnung *Science and Technology Studies*.

thodologischen Falluntersuchungen von Bruno Latour, Steve Woolgar (Latour/Woolgar 1979; Latour 1987) und Karin Knorr-Cetina (1984) und das »relativistische Programm« von Harry M. Collins (1981, 1985) haben die »black box« der Produktion des wissenschaftlichen Wissens erstmals konsequent geöffnet, indem sie sich der Untersuchung von noch »unfertigem« Wissen durch teilnehmende Beobachtung des Forschungsalltags im Labor beziehungsweise durch die Rekonstruktion zeitgeschichtlicher wissenschaftlicher Kontroversen zuwandten.¹⁰ Alle bisherigen Untersuchungen setzten an »fertigem« wissenschaftlichem Wissen an. Publiziertes Wissen ist jedoch bereits stilisiertes Wissen, das keinen Rückschluß mehr auf den tatsächlichen Verlauf der Forschung im Labor zuläßt (Medawar 1963). In ähnlicher Weise argumentierte Collins, daß historische Studien, die nach dem Vorbild der traditionellen Wissenschaftssoziologie von »fertigem« Wissen und »gültigen« Theorien ausgehen, sich der Gefahr aussetzen, im Rahmen retrospektiver Rationalisierungen des tatsächlichen Verlaufs wissenschaftlicher Kontroversen gewissermaßen eine Geschichte der Sieger zu schreiben, aus denen die sozialen Verhandlungsprozesse und politischen Konflikte getilgt sind, die über den Sieg oder die Niederlage bestimmter Theorien entschieden haben.

Die sozialkonstruktivistischen Studien haben das Bild von der Wissenschaft als einem epistemisch vorgeblich privilegierten kognitiven Bereich gründlich zerstört. In der Wissenschaft ereignet sich nichts epistemisch Außergewöhnliches, sie besitzt keinen epistemologischen Sonderstatus (Knorr-Cetina 1995a: 151). Auch von einer Einheit der Wissenschaft kann so wenig die Rede sein wie von einer einheitlichen wissenschaftlichen Methode. Die Wissenschaft zerfällt vielmehr in eine heterogene Vielzahl von »epistemic cultures«, in der sich die tiefgreifende »disunity of the sciences« manifestiert (ebd.: 158). Desgleichen finden sich in der »black box« keine desinteressierten, universalistisch orientierten Denker, die objektiven Regeln folgend die Suche nach Wahrheit betreiben. Zum Vorschein kommen vielmehr

10 Ich verzichte an dieser Stelle auf die Darstellung des sogenannten »Strong Programms« von David Bloor (1976), das eine makrosoziologische Perspektive einnimmt. Bloors Programm hatte anfänglich eine große Bedeutung für den konstruktivistischen Ansatz. Seine Forderung, kognitive und soziale Konzepte symmetrisch zu behandeln, bildete die gemeinsame Ausgangsposition der Science and Technology Studies. Im Zuge der Entwicklung dieser Studien ist Bloors Programm dann jedoch zunehmend als interessenreduktionistisches Konzept und Kongruenzmodell von Wissen und Interessen kritisiert worden (Knorr-Cetina 1982) und spielt in der neueren Diskussion keine entscheidende Rolle mehr. Für die hier verfolgten Zwecke ist Bloors Programm ohnehin nicht von Bedeutung.

gewöhnliche, selbstinteressierte und opportunistische Akteure, die in alltagsweltliche Kommunikationen involviert sind, Konflikte um Prioritätsansprüche und intellektuelles Eigentum austragen, in hitzigen Debatten widersprüchliche Botschaften verkünden und um finanzielle und materielle Ressourcen konkurrieren.

Die Realität liefert keine objektiven Kriterien, mit denen sich zweifelsfrei über »wahre« und »falsche« Theorien entscheiden ließe. Wissenschaftliche Theorien stabilisieren sich in einem mehrstufigen Prozeß, den Latour und Woolgar als »deletion of modalities« bezeichnen. Beobachtungen und Behauptungen werden sukzessive von ihren kontextuellen Bedingungen abgelöst und in kontextfreie Feststellung überführt, indem andere Akteure ihnen Glauben schenken und sie zu Prämissen ihrer eigenen Arbeit machen. Sie steigen eine »Leiter der Faktizität« empor, auf der individuelle und lokale Ungewißheit zunehmend in intersubjektive und globale Gewißheit transformiert wird.

Wie die Untersuchungen von Latour/Woolgar und Knorr-Cetina sowie zahlreiche Laborstudien, die im Anschluß an diese Arbeiten entstanden sind, zeigen, folgt das alltägliche Forschungshandeln im Labor alles anderem als epistemisch rationalen Regeln und methodisch eindeutig definierten Verfahren mit vorhersehbaren Ergebnissen. Es ist vielmehr »situativ« und »okkasionell« orientiert, stützt sich »opportunistisch« (Knorr-Cetina 1984) auf lokal verfügbare Materialien, Werkzeuge und Ressourcen, richtet sich nach variablen Regeln und basiert auf idiosynkratischen Verfahren mit schwer vorhersehbaren und ungewissen Ergebnissen. Lynch, Livingston und Garfinkel (1983: 212) sprechen vom »circumstantially contingent« und »unwitting« Charakter der Forschungspraxis im Labor.

Seinem kontingenten Charakter entsprechend besteht der Forschungsalltag im Labor in der Hauptsache im »Management von Ungewißheit« (Star 1985). Auch eindeutig nicht-epistemischen Argumenten kommt im Prozeß der Tilgung von Modalitäten häufig eine entscheidende Rolle zu. »Scientists continually crisscross the border between considerations that are in their view <scientific> and <nonscientific>« (Knorr-Cetina 1995a: 154). In wissenschaftlichen Publikationen ist diese Ungewißheit und der kontingente Charakter des Forschungsprozesses allerdings nicht mehr zu erkennen. Auf dieser Sprosse auf der »Leiter der Faktizität« werden aus irritierenden Beobachtungen erwartete Befunde und aus Mutmaßungen Feststellungen. »The published data reveal, rather than hint; articles state, rather than guess« (Star 1985: 392).

Über die Untersuchung der Rolle von Beobachtungen hinaus hat sich der konstruktivistische Ansatz im Verlauf der achtziger Jahre zunehmend auch der technischen Dimension ihrer Fabrikation zugewandt und auf die »material procedures« (Pickering 1989) des Forschungsprozesses ausgedehnt. Theorien werden nicht an der Wirklichkeit überprüft. Niemand kann Atome, Chromosome oder Einkommensverteilungen unmittelbar beobachten. Was Wissenschaftler beobachten, sind Ereignisse, die mit der Hilfe von Instrumenten, Apparaturen und Maschinen erzeugt werden und die sich auf höchst indirekte Weise auf die Realität beziehen. Man sieht nicht durch das Mikroskop, sondern mit dem Mikroskop, wie Ian Hacking sagt (1983: 208). Wissenschaftler benutzen, wie Latour und Woolgar dies mit einem Begriff von Gaston Bachelard nennen, »inscription devices«¹¹, d.h. »items of apparatus or particular configurations of such items which can transform a material substance into a figure or diagramm« (Latour/Woolgar 1979: 51).

»Inscription devices« dienen dazu, aus artifiziellen Vorgängen bestimmte Eigenschaften der Realität abzuleiten, sie sozusagen sichtbar zu machen und aus weißem Rauschen Signale herauszufiltern. Dabei besteht allerdings in der Regel eine große Kluft und lediglich lose Koppelung zwischen den theoretischen Vorstellungen über die Funktionsweise der Instrumente und Maschinen und der experimentellen technischen Praxis. »Inscription devices« enthalten meist keine explizite und instruktive Theorie dessen, was ein Instrument mißt, welche Zustände eine Maschine annehmen kann und welche Interpretationen ihr Verhalten zuläßt oder ausschließt. Da sich die technische Komplexität der Instrumente, Maschinen und Anlagen in aller Regel einer theoretischen Erklärung entzieht, sieht sich das praktische Forschungshandeln ständig mit hoher Ungewißheit, unerwarteten Effekten und widersprüchlichen Ergebnissen konfrontiert.

Die Probleme der »material procedures« sind folglich die alles beherrschenden Themen des Forschungsalltags und machen die Forschungspraxis im wesentlichen zu einem technischen Handwerk. Wissenschaftliche Arbeit erfordert über weite Strecken »craft« und »tacit knowledge«, praktische und technische Fertigkeiten, die nicht formal erlernt, sondern nur »in situ«, durch Erfahrung und »learning by doing« erworben werden können. Sie »wird hauptsächlich durch informal und stillschweigend angewandte Methoden gelenkt und kontrolliert und nicht durch ausdrücklich offen ausgesprochene« (Ravetz 1973: 84–85). Der Umgang mit Maschinen, Instrumen-

11 Auf deutsch lautet der Begriff noch weniger schön »Aufschreibsysteme« (vgl. Kittler 1987).

ten und Apparaturen muß meist über lange Zeit eingeübt werden, erfordert Fingerspitzengefühl und intuitives Urteilsvermögen darüber, ob ein »Gerät ›befriedigend‹ funktioniert« (ebd.: 90).¹²

Globaler Konsens über »inscription devices« entsteht in dem Maße, wie die Probleme der materiellen Prozeduren durch Standardverfahren und Routinen gelöst werden können. Je besser die Apparaturen und Maschinen beherrscht werden und je stabiler Meßergebnisse voraussagbar sind, um so mehr erscheinen die technischen Prozeduren zugleich als »neutrale« Instrumente, die bestimmte Realphänomene sichtbar machen. Mit der wachsenden technischen Handlungssicherheit und Zuverlässigkeit, mit der bestimmte Resultate erzielt werden, stellt sich Gewißheit über die Validität der Verfahren ein. Die Regularität des technischen Apparats reifiziert die fabrizierten Fakten, und künstlich erzeugte Ereignisse muten jetzt als natürliche Phänomene und problemlose Daten an. Oder in den Worten von Latour und Woolgar:

The artificial reality, which participants describe in terms of an objective entity, has in fact been constructed by the use of inscription devices. Such a reality, which Bachelard terms the ›phenomenotechnique‹, takes on the appearance of a phenomenon by virtue of its construction through material techniques.
(Latour/Woolgar 1979: 64)

Wissenschaftlichen Fakten kommt damit der Status von »Standards« zu (so bereits Ravetz 1971: 233). Sie sind »standard-packages« (Latour 1987) von Theorien und Methoden, die endgültig dann den Charakter »objektiver« Daten annehmen, wenn sie mit der Schließung der Kontroversen zu »Black-Box-Systemen« werden, die in anderen Disziplinen oder für praktische Zwecke routinemäßig genutzt werden.¹³

Callon und Latour haben dann um die Mitte der achtziger Jahre ihren ursprünglich auf Laboruntersuchungen beschränkten Ansatz zu einem netzwerktheoretischen Konzept erweitert, demzufolge lokale Deutungen in dem Maße zu globalen Fakten werden, wie es gelingt, »to enrol others so that

12 Callon und Latour gehen in diesem Zusammenhang so weit, den technischen Apparaturen und Untersuchungsmaterialien den Status von »nonhuman actors« und »negotiating parties« zuzuweisen (Callon 1986; Latour 1987; Callon/Latour 1992). Dies hat freilich die berechtigte Frage aufgeworfen, welchen Sinn es macht, das Konzept des Aushandelns auf die dingliche Welt zu übertragen, wenn diese Welt mit uns nicht intentional interagiert (Collins/Yearly 1992; Hasse/Krücken/Weingart 1993).

13 Auch die Mathematik benutzt, wie Ravetz dies im dritten Kapitel von »Die Krise der Wissenschaft« zeigt, solche theoretischen und methodischen »Standardpakete«, in denen die Teilsätze »nicht miteinander konvergieren« und die nur »hinreichend solide« sind (Ravetz 1971: 88–127, 174–191).

they participate in the construction of the fact« (Latour 1987: 108). Wenn sich, mit anderen Worten, durch die »Konstruktion eines Publikums«, »Anwerbung von Verbündeten« und »Übertragung von Interessen« ein inner- und außerwissenschaftliches Publikum herausbildet, das sich bestimmten Themen und Forschungsfragen anschließt beziehungsweise finanziell unterstützt, und Verbündete entstehen, die willens sind, bestimmte Fakten zu reproduzieren und im Zuge dieser Reproduktion selbst »vested interests« entwickeln, die sie an bestimmte Theorien binden.

Auch das relativistische Programm von Harry M. Collins schließt sich dieser Botschaft im wesentlichen an. Collins und die um ihn versammelte Forschergruppe haben in einer Vielzahl von Fallstudien zeitgenössische wissenschaftliche Kontroversen rekonstruiert, um der Frage nachzugehen, auf welchen Wegen und durch welche Mechanismen theoretische Debatten entschieden werden. Öffnet man die »black box« solcher Kontroversen und rekonstruiert die Auseinandersetzungen nicht vom Standpunkt des heutigen Wissens, sondern aus der Perspektive des noch manifesten Konflikts, so wird deutlich, daß sie regelmäßig und nicht nur in spektakulären Ausnahmefällen »politisiert« Diskussionen durch kontingente soziale Faktoren und profane politische Konflikte entschieden werden, in denen die Opponenten organisatorische und materielle Ressourcen mobilisieren, um ihre jeweiligen Positionen durchzusetzen. Wissenschaftliche Kontroversen sind

conflicts over the control of social and material support networks. The strategy is to enroll as many powerful as agents as possible to support one's own claims and, simultaneously, to cut off conflicting statements from their networks. (Fuchs 1992: 55)

Ist diese Strategie erfolgreich, so wird durch die »Schließung« (»closure«) der Kontroversen konsensuelle Normalwissenschaft entstehen.

In den Auseinandersetzungen zwischen den konkurrierenden theoretischen Ansätzen und wissenschaftlichen Weltansichten sind die Chancen zur Mobilisierung von sozialen Netzwerken und materieller Unterstützung zudem nicht gleich verteilt. Diese Chancen hängen vielmehr von der Reputation ab, die bestimmte Wissenschaftler oder Forschungsgruppen genießen; und Reputation, dies hat auch die traditionelle Wissenschaftssoziologie stets betont, ist ein soziales Kapital, das Ungleichheit erzeugt. Merton (1985) hat dies als den »Matthäus-Effekt« der Wissenschaft bezeichnet: Wer hat, dem wird gegeben. Einmal erworbene Reputation privilegiert Wissenschaftler oder wissenschaftliche Glaubensgemeinschaften gegenüber ihren weniger bekannten Widersachern. Da Wissenschaftlern mit höherem Prestige zu-

gleich die größere Vertrauenswürdigkeit zugeschrieben wird, besitzen sie die besseren Chancen, soziale und materielle Unterstützung zu mobilisieren und Kontroversen für sich zu entscheiden.

1.4 Auswege aus der konstruktivistischen Konfusion – Forschungshandeln als Problemlösungshandeln und ein Kontingenzmodell von Forschungsorganisation

Der Konstruktivismus hat die quasi-religiöse Vorstellung von der Wissenschaft als Produzentin objektiver Wahrheiten zerstört und ihr den Nimbus eines privilegierten kognitiven Systems endgültig genommen. Er hat heute auch den Mertonschen Ansatz abgelöst und die wissenschaftssoziologische Landschaft grundlegend verändert. Zugleich aber ist die konstruktivistische Revolution gegenwärtig selbst in Stagnation verfallen und in einer Art Hyper-Kontingenztheorie des wissenschaftlichen Wissens erstarrt. Der ganz überwiegende Teil der konstruktivistischen Literatur begnügt sich nach wie vor mit Kritik an der epistemologischen Orthodoxie und einer ständig erneuerten Entmythologisierung der Wissenschaft. Seit Jahren reihen sich mikrosoziologische Falluntersuchungen an mikrosoziologische Falluntersuchungen, die nach dem immer gleichen und rein deskriptiven Muster den immer gleichen Zweck verfolgen, den indexikalischen, idiosynkratischen und situativen Charakter des Forschungshandelns nachzuweisen. Diese Studien »do not seem to add up to anything« (Fuchs 1992: 79). Jeder untersuchte Fall zeugt erneut vom Opportunismus des Forschungshandelns und der Kontingenz des wissenschaftlichen Wissens. Sie fördern auch keine Varianz zwischen unterschiedlichen Forschungsfeldern zutage. Im Licht ihrer Empirie scheinen die Mechanismen der »Schließung« von Theorien und die Modalitäten der Konsensfindung zwischen Wissenschaftlern in allen Disziplinen gleich und gleichermaßen kontingent zu sein.

Aber auch die theoretischen Beiträge der konstruktivistischen Literatur addieren sich nicht auf. Dem Bild von der Hyper-Kontingenz des wissenschaftlichen Wissens entspricht in dieser Literatur eine unergiebigere Relativismus-Debatte mit teilweise heftigen Richtungskämpfen.¹⁴ Im Verlauf der

14 Wie weit die einzelnen Positionen heute auseinanderliegen, zeigen die Beiträge in dem jüngst von Pickering herausgegebenen Sammelband (Pickering [Hrsg.] 1992).

achtziger Jahre sind immer neue theoretische Varianten und Spielarten des Konstruktivismus entstanden, die den philosophischen Realismus einer immer radikaleren Kritik unterzogen und die Epistemologie (mikro-) soziologisch zu begründen suchten.¹⁵ Hierzu zählt vor allem das »reflexivistische Programm«, das die Relevanz kognitiver Konzepte und empirischer Evidenz für die Genese und Validierung des wissenschaftlichen Wissens nunmehr vollkommen bestreitet und dieses Wissen diskursanalytisch zu dekonstruieren sucht (Ashmore 1989; Mulkey 1985; Woolgar 1988).

In jüngerer Zeit mehren sich allerdings Stimmen, die dazu auffordern, diese unfruchtbare Diskussion zu beenden und zu einer Soziologie des wissenschaftlichen Wissens zurückzukehren. Zum einen baut sich, wie Gieryn zeigt, die radikal relativistische Kritik am epistemischen Realismus ihre Gegner größtenteils selbst auf. Sie kommt vielfach einem Kampf gegen Windmühlenflügel gleich, attackiert Positionen, die dort nicht oder bereits seit langem nicht mehr verteidigt werden, und fällt streckenweise stark hinter das Niveau der philosophischen Diskussion zurück. Zum anderen unterschätzt diese Kritik bei weitem die Bedeutung, die der Empirie und empirischer Evidenz für die Entwicklung und den Wandel des wissenschaftlichen Wissens zukommen (Gieryn 1982).¹⁶ So wäre es in der Tat schwer vorstellbar, wie es etwa zu unerwarteten Entdeckungen kommen könnte, wenn das Forschungshandeln rein sozial konditioniert sein sollte. Schwerer noch ließe es sich für diesen Fall erklären, daß solche Entdeckungen in den wissenschaftlichen Gemeinschaften häufig auf spontanen Konsens treffen, obwohl sie jahrelange Investitionen in Experimente oder Theorien mit einem Schlag entwerten.¹⁷ Ebenso wären die vielen Fälle von parallelen Entdeckungen

15 Wie Collins bemerkt, der sein »empirical programme of relativism« gegen diese neuen Spielarten abgrenzt, gab sich jede dieser neuen Varianten »a little more radical than the one before it. Each new variant has stood longer on the relativist road. ... Sociologists of scientific knowledge believed they were solving epistemological puzzles that had defeated philosophers. They believed that the close study of the activity of scientists showed that even in the hardest case of knowledge truth was a socially organized upshot of contingent courses of linguistic, conceptual and social behaviour« (Collins/Yearley 1992a: 303).

16 Wie ja auch verwunderlich ist, so Larry Laudans (1977) berühmtes anti-relativistisches Argument, daß Relativisten die Mühe empirischer Arbeit auf sich nehmen und ihre Position mit empirischen Argumenten verteidigen, wenn doch die Empirie für die Entwicklung des wissenschaftlichen Wissens keine Rolle spielt.

17 Dies gilt sogar für konzeptionelle Vorschläge. So haben etwa die Konkurrenten von Watson und Crick deren Vorschlag, die DNS als Doppelhelix zu konzeptualisieren, spontan akzeptiert, obwohl sie andere Strukturen favorisierten, weil dies auf plausible Weise viele Rätsel auflöste und neue Forschungsperspektiven eröffnete (Cole 1992: 47–53).

und Prioritätsstreitigkeiten undenkbar, wenn es in der Wissenschaft nicht um mehr als um kontingentes, okkasionell, idiosynkratisch und situativ erzeugtes Wissen ginge (Zuckermann 1988). Schließlich fragt es sich natürlich ebenfalls, wie unter dieser Bedingung verlässliches und prognostisch erfolgreiches Anwendungswissen entstehen könnte, über das die moderne Wissenschaft ja durchaus verfügt. Wählt man einen hinreichend langen historischen Beobachtungszeitraum, mögen die Chancen groß sein, daß sich auch dieses Wissen als falsch oder nur in einem eingeschränkten Sinn als gültig erweist. Dies schließt aber nicht aus, daß es sehr robuste Theorien gibt, die bestimmte Phänomene besser erklären oder sich besser anwenden lassen als andere (Galison 1987; Giere 1988).

Zudem bringen neue Untersuchungen von Stephen Cole (1992), Ronald Giere (1988) oder Martin Rudwick (1985), die die Thesen der Science and Technology Studies auf der Basis eigener empirischer Untersuchungen überprüft haben, eine wesentlich größere Varianz zwischen unterschiedlichen Forschungsgebieten als die konstruktivistische Literatur ans Licht. Diese Untersuchungen liefern selbst empirische Belege für den Einfluß sozialer und politischer Faktoren auf die Schließung von Kontroversen und für wissenschaftlichen Partikularismus. Allerdings haben sie andererseits auch Gegenbeispiele zu der Behauptung von der sozialen Determiniertheit wissenschaftlicher Theorien, Fälle der desinteressierten Wahrheitsuche »among gentlemanly specialists« (Rudwick 1985) und Evidenz für die universalistische Funktionsweise des wissenschaftlichen Belohnungssystems nachgewiesen.

Mit Einwänden solcher Art sieht sich der Konstruktivismus heute einer wachsenden Mertonschen Gegenkritik ausgesetzt, die sich für ein Modell des Forschungshandelns als »problem solving« ausspricht, das sich am Nutzen wissenschaftlicher Beiträge für die Lösung theoretischer oder praktischer Probleme und befriedigender Problemlösungen orientiert. So argumentiert etwa Cole, daß die Konstruktion wissenschaftlichen Wissens

is constrained to a greater or lesser extent by input from the empirical world ... and that the relative importance of this influence as compared with social processes is a variable which must be empirically studied. (Cole 1992: x)

Er schlägt dazu ein Modell vor, demzufolge wissenschaftliche Beiträge »according to their utility in generating new research puzzles and in solving existing ones« evaluiert werden (1992: 27).

Ebenfalls in diese Richtung weist die Untersuchung von Giere, der erstmals explizit Herbert Simons Konzept der »bounded rationality« in die Wis-

senschaftsforschung eingeführt hat (Simon 1945; Giere 1988: 157–178). Giere konzeptualisiert das Forschungshandeln als »an exercise of ordinary human judgement« (Giere 1988: xvii). Seine empirischen Untersuchungen »confirmed the existence of contingency and negotiation in laboratory research« (ebd.: 114), zeigen in seinen Augen aber zugleich auch, daß die Kontingenz experimenteller Ergebnisse und Verhandelbarkeit von Beobachtungen nicht notwendigerweise zu einer relativistischen Theorie des wissenschaftlichen Wissens führen müssen. Für Giere ist die Annahme, »that science embodies some special form of rationality that philosophers might uncover« (ebd.: xvi) nicht notwendig, um zu zeigen, »that there is room for a modest but yet robust scientific realism« (ebd.: xvii). Wissenschaftler müssen theoretische und experimentelle Entscheidungen treffen, deren Resultate ungewiß sind. Sie werden dabei diejenigen Optionen wählen, die den größten Erklärungserfolg versprechen und weniger erfolgsträchtige Alternativen erst weiter verfolgen, wenn sie mit den zunächst gewählten Theorien oder experimentellen Verfahren scheitern. Falls sich einmal gewählte Optionen dagegen bewähren und zu erfolgreichen Prognosen beziehungsweise praktikablen Ergebnissen führen, werden sie sich als »satisficers« verhalten, wenn sich Theorien als ausreichend »robust« erweisen (ebd.: 157–178). Giere vermutet, daß sich der konstruktivistische Relativismus hauptsächlich an Forschungsgebieten mit fragilem Wissen orientiert.

Soweit Teile der konstruktivistischen Literatur sich nicht mit epistemologischer Kritik begnügen, kommen sie zu ähnlichen Ergebnissen wie die Mertonsche Kritik am relativistischen Konstruktivismus. Dies gilt vor allem für den Teil der konstruktivistischen Literatur, der unter der Bezeichnung »science as practice« die Soziologie des wissenschaftlichen Wissens zu einer Theorie des praktischen Forschungshandelns weiterzuentwickeln sucht (Hacking 1983, 1992; Gooding 1992; Pickering 1989; Pickering/Stephanides 1992). Dieser Ansatz knüpft an Latours These von der technischen Fabrikation von Phänomenen und Fakten an und geht den interaktiven Beziehungen zwischen der Theoriebildung und dem experimentell-technischen Handeln in der Wissenschaft nach. Seine Hauptaussage läuft darauf hinaus, daß wissenschaftliche Theorien in iterativen Prozessen an »Widerstände« der materiellen Welt angepaßt und mit ihnen in Übereinstimmung gebracht werden (Pickering 1989: 279; Gooding 1992: 69). Es ist nur in seltenen Ausnahmefällen möglich, Modelle so präzise zu formulieren und Experimente so genau zu definieren, daß keine interpretativen Spielräume mehr verbleiben, und in der Forschungspraxis kommt die Theorie nicht per se vor dem Experiment, wie dies das traditionale Rationalmodell der Wissenschaft

annahm. Es gibt viele Arten und Ebenen der Theoriebildung, die in unterschiedlichen Wissenschaften an unterschiedlichen Entwicklungspunkten in unterschiedlichen Beziehungen zum experimentellen Handeln stehen. Viele Experimente »create phenomena that did not hitherto exist in a pure state in the universe« (Hacking 1983: xiii). Theorien werden nicht falsifiziert, sondern neuen Phänomenen angepaßt, wenn plötzliche Entdeckungen im Widerspruch zu den theoretischen Erwartungen stehen.

Theorien und experimentelle Techniken, so Hacking, »are mutually adjusted to each other« (1992: 30). Sie werden »vis-à-vis« validiert und aneinander angepaßt, bis sich eine stabile Übereinstimmung zwischen den Daten, den theoretischen Erwartungen und den Annahmen über die Funktionsweise der Instrumente und Maschinen ergibt.¹⁸ Andrew Pickering (1989: 279) spricht in diesem Zusammenhang davon, daß wissenschaftliche Theorien »in accommodation to resistancies arising in the material world« entwickelt werden (vgl. auch Pickering/Stephanides 1992). Ist einmal eine stabile Übereinstimmung zwischen den Theorien und Experimenten erreicht, geht ein Forschungsfeld in eine Normalwissenschaft über. »There is no drive for revision of the theory because it has acquired a stable data domain« (Hacking 1992: 55). Oder wie David Gooding dies formuliert:

the representations and the phenomena gradually *converge* to a point where the resemblance between what can be observed and what is sought is ›self evident‹ or (as Faraday put it) ›very satisfactory‹.

(Gooding 1992: 102; Hervorh. im Original)

Zu einem Modell des Forschungshandelns als »problem solving« kommt auch die konstruktivistische Literatur, die eine Präzisierung des Akteur/Netzwerk-Ansatzes und des Konzepts der »Interessenübertragung« von Latour anstrebt. So hat Susan Star in ihren Arbeiten über »Simplification in Scientific Work« (1983) und »Scientific Work and Uncertainty« (1985) die

18 Hacking's Theorie der Entstehung und Validierung wissenschaftlichen Wissens läuft dennoch nicht auf einen erkenntnistheoretischen Relativismus hinaus, sondern wendet sich vielmehr gegen die mit dem Realismus einmal verbundene Vorstellung von der Einheit der Wissenschaft. Die wechselseitige Anpassung von Modellen und Methoden reduziert zwar die Korrespondenztheorie der Wahrheit auf eine Korrespondenztheorie »of thought, action, materials, and marks« (Hacking 1992: 58). Als »wahr« können Theorien strenggenommen nur in Bezug auf die Daten oder Vorgänge gelten, die durch die technische Apparatur erzeugt werden. In den Augen Hacking's spricht aber gerade dies gegen den Relativismus und für einen »down-to-earth materialism« (ebd.: 30), da sich damit letztlich die Empirie als der »Leim« erweist, »that keeps our intellectual and material world together« (ebd.: 58).

Funktion von theoretischen und methodischen »standard-packages« für die Herausbildung und Koordination von Forschungsnetzwerken untersucht. Obwohl diese Standardpakete von Theorien und Methoden oft inkonsistentes Wissen enthalten und ihr wissenschaftlicher Nutzen ungewiß ist, werden sie innerhalb von Forschungsnetzwerken häufig über lange Zeiträume als stabil akzeptiert. Stars Arbeiten haben eine Reihe von empirischen Fallstudien nach sich gezogen (Clarke 1990; Fujimura 1987, 1988, 1992; Gerson 1983; Star 1986, 1989; Star/Griesemer 1989), die die Stabilität solcher Standardpakete darauf zurückführen, daß sie es Wissenschaftlern in unterschiedlichen Gebieten, wie etwa der klinischen und der biologischen Forschung, ermöglichen »to construct and solve ›doable‹ problems« (Fujimura 1992: 177).

Joan Fujimura zufolge erklärt sich etwa der molekularbiologische »bandwagon« in der Krebsforschung, dem sich viele unterschiedliche Forschungsrichtungen mit zunächst stark divergierenden Definitionen von Krebs angeschlossen, dadurch, daß die Molekularbiologie eine »robuste Theorie« (ebd.: 181) der Verursachung von Krebs lieferte, die mit klinischen, onkologischen, epidemiologischen und anderen Ansätzen kompatibel war (ebd.: 168–211).¹⁹

The package consisted of a scientific theory and a standardized set of technologies which succeeded in enrolling many members of multiple social worlds in constructing a new and at least temporarily stable definition of cancer. (ebd.: 177)

Vor dem Hintergrund dieser Modellierungen des Forschungshandelns als Problemlösungshandeln und insbesondere der von Star und Fujimura herausgearbeiteten Funktion theoretischer und methodischer Standardpakete für die Koordination und Stabilisierung von Forschungsnetzwerken läßt sich nun das hyperkontingente Bild überwinden, das der Konstruktivismus von der kognitiven und sozialen Organisation der Wissenschaften zeichnet. Die Frage nach den Gründen für die Varianz in der Funktionsweise und sozialen Organisationsform unterschiedlicher Forschungsgebiete kann vor diesem Hintergrund jetzt in die Frage überführt werden, unter welchen Bedingungen es wahrscheinlich ist, daß sich auf einem Feld standardisiertes Wissen herausbildet und damit auch stabile forschungspolitische Netzwerke entstehen können beziehungsweise unter welchen Bedingungen das Wissen und somit zugleich die sozialen Beziehungen fragil sein werden.

19 Was Star zu dem Schluß führt: »Scientists are intelligent problem-solvers and their methods are sensible in the context of their constraints and resources« (Star 1985: 393).

Eine Antwort auf diese Frage hat Richard Whitley bereits Mitte der achtziger Jahre in seiner Arbeit »The Intellectual and Social Organization of the Sciences« (1984) im Rahmen eines organisationssoziologischen Ansatzes entwickelt.²⁰ In dieser Arbeit argumentiert Whitley, daß es mit einer Modellierung des Forschungshandelns als Problemlösungshandeln möglich wird, an Theorien und Modelle der Arbeits- und Organisationssoziologie anzuknüpfen und eine komparative Wissenschaftssoziologie zu entwickeln. Gerade wenn sie keinen epistemischen Sonderstatus besitzt, präsentiert sich die Wissenschaft lediglich als ein Spezialfall von Profession, auf den sich prinzipiell dieselben analytischen Instrumente anwenden lassen wie auf jede andere Form von kollektiv organisierter Produktion.

If we agree that scientific research is a type of craftwork which involves problem-solving on artificial objects, then it seems reasonable to analyse the social organization which structures and controls this activity as a system of work organization and control which can be understood in a similar way to other forms of work organization. (Whitley 1984: 10)²¹

Als Spezialfall unterscheidet sich die Wissenschaft von anderen Professionen durch ihre Orientierung an intellektuellen Neuerungen und innovativem Wissen, aber auch die Forschung bedarf der Koordination und Kontrolle. Forschungsbeiträge müssen sich aufeinander beziehen, Forschungsziele abgestimmt werden und Forschungsergebnisse miteinander vergleichbar sein. Ebenso ist die Wissenschaft in bestimmte institutionelle und organisatorische Strukturen eingebettet, und diese Strukturen reduzieren ihr Innovationspotential und wirken sich selektiv auf die Agenda der Forschung aus, indem sie Ressourcen kanalisieren und knappe Aufmerksamkeit binden. Damit aber hängt die kognitive Dynamik der Wissenschaft weithin von institutionellen Bedingungen ab, die ihrerseits kontingent sind und die sowohl in der historischen Entwicklung als auch von Fachgebiet zu Fachgebiet vari-

20 Sein Buch ist zwar teilweise geradezu begeistert als wegweisend aufgenommen worden – Randall Collins etwa bescheinigt ihm: »This is the most advanced theoretical analysis written in the sociology of science« (Collins 1988: 291) –, es hat die empirische Wissenschaftsforschung bislang aber kaum angeleitet. Die Arbeiten von Stephan Fuchs, die eng an Whitley anknüpfen, sind rein programmatischer Natur (Fuchs 1986, 1992; Fuchs/Turner 1986). Eine der wenigen Ausnahmen ist Raimund Hasse (1995), der neuerdings in seiner Analyse der sozialen Organisationsform der Biologie auf Whitleys Modell rekurriert.

21 Dieser Vorschlag stützt sich vor allem auf die Arbeiten von: Woodward (1965), Burns/Stalker (1966), Thompson (1967), Perrow (1970), Lawrence/Lorsch (1972) und Mintzberg (1979).

ieren. Stephan Fuchs spricht in diesem Zusammenhang davon, daß der »kognitive Stil« eines Fachs von seiner sozialen Organisation geprägt wird (Fuchs 1992: 77–109).

Dementsprechend wird auch der Grad der Standardisierung des wissenschaftlichen Wissens in hohem Maße mit der Form und Intensität der institutionellen Koordination eines Feldes variieren. Auf hierarchisch strukturierten und straff organisierten Forschungsfeldern werden die Forschungsziele stärker miteinander abgestimmt sein und sich die Beiträge intensiver aufeinander beziehen als auf Feldern, die über keine hierarchische Spitze verfügen und nur schwach koordiniert sind. »Generally, the more concentrated is control over the major communication media, the easier is it for a small élite to set standards and direct research strategies« (Whitley 1984: 107). Ein Feld, auf dem Kontrolle über die Mittel der Wissensproduktion stark zentralisiert ist, wird damit zugleich robustere Standards und stabileres Wissen erzeugen als etwa ein polyzentrisch strukturiertes Gebiet.

Dieser Zusammenhang gilt aber nicht nur für die Mechanismen der wissenschaftlichen Selbstorganisation und Selbststeuerung, sondern ebenso und namentlich für den Einfluß staatlicher und forschungspolitischer Maßnahmen auf die kognitive Agenda der Wissenschaft. Die staatliche Forschungspolitik greift heute tief in diese Agenda ein, und sie tut dies nicht nur im Hinblick auf die Wahl der Forschungsthemen, sondern auch, was den »kognitiven Stil« der Wissenschaft anbelangt. Wie bereits Jerome Ravetz (1973) feststellte, ging die Ausdifferenzierung der staatlichen Forschungspolitik nach dem Zweiten Weltkrieg mit einer Tendenz zur »Industrialisierung« der Wissenschaft einher, durch die sie sich zulasten ihres Innovationspotentials immer stärker an standardisierbaren Praktiken und pragmatischen Routinen orientiert hat. Ähnlich sieht dies auch Whitley:

The growth of state funding of research and state policies for the direction and management of research encouraged the domination of a particular kind of knowledge production and of its control. Increasingly this has become identified with the laboratory-based sciences where standardized techniques and work procedures enable researchers to produce reliable, predictable knowledge for a variety of social purposes about a variety of subjects. The more co-ordination and central planning of scientific research there is, the more similar and comparable scientific fields will become in their dominant pattern of work organization and in their intellectual ideals. (Whitley 1984: 302–303)

In besonderem Maße trifft diese Feststellung auf das Modell der Großforschung als einer hierarchischen Form von Forschungsorganisation zu, bei

der die staatliche Politik sowohl die Forschungsziele vorgibt, als auch deren Umsetzung auf bürokratischem Weg zu kontrollieren sucht. Daher ist zu vermuten, »that any form of ›big science‹ is likely to encourage concentration of control in science and increase the degree of mutual dependence and co-ordination problems« (ebd.: 108).

Aber diese bürokratische Überformung der Wissenschaft stößt sowohl, was ihre internen Organisationsstrukturen angeht, als auch, was die staatliche Organisation der Forschung betrifft, an Grenzen. Es reicht nicht aus, mit Stephan Fuchs die Kausalitäten einfach umzudrehen, indem man Kuhn vermeintlich vom Kopf auf die Füße stellt und nunmehr schlicht die organisatorischen Strukturen zur unabhängigen und den »kognitiven Stil« der Wissenschaft zur abhängigen Variablen erklärt (Fuchs 1992: 190, 193–215; vgl. dazu auch Zabusky 1993).²² Die Dinge liegen dann doch etwas komplizierter, wengleich auch nicht unauflösbar komplex.

Die organisatorischen Strukturen der Wissenschaft sind ihrerseits von kognitiven Bedingungen abhängig, und beide Größen können in rekursiven Prozessen sowohl als unabhängige wie als abhängige Variablen fungieren. Hierarchische und bürokratische Formen der Koordination werden sich nur dort stabilisieren, wo es zugleich »gesichertes Wissen« (Merton 1987) im Sinne »funktionierender Kausalitäten« (Japp 1997: 305) gibt oder solches Wissen durch organisatorische Maßnahmen erzeugt werden kann. Mit hoher kognitiver Ungewißheit ist die Form der hierarchischen Koordination hingegen weitgehend unverträglich. Eine Kombination von bürokratischer Kontrolle und hoher kognitiver Ungewißheit

is not likely to be very stable. ... Where in other words, working methods are not clearly understood and do not produce visible, predictable, and replicable results the uniformity and stability of their products cannot be very high because it is impossible to be sure what they are in any standard way. Instead solutions to problems will vary considerably across work-places, and so too will be the

22 Fuchs vertritt in der Tat ein deterministisches und zugleich durch und durch voluntaristisches Modell der Wissensproduktion. So bedarf etwa die Soziologie in seinen Augen nur einer bürokratischen Struktur, um sich zu einer Normalwissenschaft zu entwickeln. »We will engage in hermeneutics and conversation rather than in science and fact production as long as the structure of our profession remains loosely organized« (Fuchs 1992: 215). Daß eine solche hierarchische Struktur nicht entsteht, führt er darauf zurück, daß »the conversational life-form is more pleasant than a bureaucratic one« (ebd.: 215). Was aber, wenn hermeneutische Verfahren manchen Forschungsgegenständen der Soziologie sehr viel mehr angemessen sind als »fact production« und sich selbst den strengsten bürokratischen Zwangsmaßnahmen nicht fügen?

ways in which problems are understood so that standardized, stable formulations are improbable. (Whitley 1984: 125)²³

Statt auf eine lineare Abhängigkeit läuft die Beziehung zwischen den institutionellen und kognitiven Strukturen der Wissenschaft auf eine wechselseitige Stabilisierung dieser Strukturen in Feldern hinaus, wo eine Standardisierung des Wissens möglich ist, während intellektuelle Unordnung mit sozialer Unordnung einhergehen wird, die das Maß der kognitiven Ungewißheit verstärkt. Dies schließt im Einzelfall nicht aus, daß auch Forschungsfelder mit hoher kognitiver Unordnung durch externe steuerungspolitische Vorgaben stabilisiert werden können, macht solche Interventionen aber riskant und ihren Erfolg fraglich.

In systematischer Form lassen sich diese Zusammenhänge anhand eines einfachen organisationssoziologischen Schemas verdeutlichen, das von Charles Perrow (1970) für die Modellierung von Arbeitsorganisationen entwickelt worden ist und auf den beiden Variablen Grad der Ungewißheit der Arbeitsaufgaben (»task uncertainty«) und Grad der Interdependenz der Arbeitsaktivitäten (»mutual dependence«) beruht. Die Kernaussage dieses Modells läuft darauf hinaus, daß sich Arbeitsaufgaben um so stärker routinisieren, standardisieren, formalisieren und hierarchisch koordinieren lassen, je geringer der Grad der Ungewißheit und je höher der Grad ihrer wechselseitigen Abhängigkeit ist. In Organisationen dieses Typs werden die Arbeitenden dementsprechend nur über wenig Einflußmöglichkeiten auf den Arbeitsprozeß verfügen. Dies ändert sich mit einem ansteigenden Grad von Aufgabenungewißheit und einem sinkenden Grad der wechselseitigen Abhängigkeit der Arbeitsaufgaben. Wo hohe Ungewißheit über den Arbeitsprozeß und das Arbeitsergebnis besteht und die Arbeitsaufgaben nur lose gekoppelt sind, nehmen die Möglichkeiten ihrer hierarchischen Koordination ab und besitzen die Arbeitenden hohe Autonomiespielräume. Die Organisation verliert Spitze und Zentrum und nähert sich dem Modell einer »organisierten Anarchie« oder auch einem »Garbage-can-Modell« an. Kreuzt man nun die beiden Variablen des Modells und überträgt es auf wissenschaftliche Forschungsgebiete, lassen sich in schematischer Weise vier Typen von Forschungsfeldern unterscheiden:

23 Dieser Zusammenhang läßt sich nur dann stabil entkoppeln, wenn Theorie und Empirie im Rahmen einer extrem »restriktiven« Theoriebildung (Rip 1982) streng voneinander getrennt werden und die Theoriebildung eine strikte Priorität besitzt. Es ist zu vermuten, daß Teile der Ökonomie mit ihrer Trennung von formalen Modellierungen und einer wenig reputierten Wirtschaftsempirie diesem Typus entsprechen (Whitley 1984: 126).

Abbildung 1 Ein Kontingenzmodell von Forschungsorganisation

		Wechselseitige Abhängigkeit	
		gering	hoch
Aufgabenungewißheit	gering	(1) Spezialisierung Polyzentrische Profession	(2) Normal-wissenschaft Integrierte Bürokratie
	hoch	(3) Permanente Revolution Fragmentierte Adhocracy	(4) Innovation und Kumulation Organische Profession

Im nordwestlichen Quadranten (1) paart sich eine niedrige Interdependenz der Forschungsaktivitäten mit einer zugleich niedrigen Ungewißheit der Forschungsaufgaben. Den Grundannahmen des Schemas zufolge wird sich auf einem solchermaßen strukturierten wissenschaftlichen Gebiet kaum ein einigendes »Paradigma« entwickeln. Es wird sich weniger an »fundamentalen Problemen«, als an der Erklärung von Einzelphänomenen orientieren und eine Spezialisierung der Forschung begünstigen. Der niedrige Grad der Aufgabenungewißheit erlaubt es, geordnete Forschungsprioritäten und Standardverfahren zur Lösung der Forschungsprobleme zu entwickeln, während es die geringe wechselseitige Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten ermöglicht, »Nischen« zu besetzen, die untereinander weithin »negativ koordiniert« (Mayntz/Scharpf 1975; Scharpf 1993) sind und mit jeweils separaten methodischen Standards arbeiten. Das Forschungsfeld wird polyzentrisch strukturiert, segmentär stratifiziert und die wissenschaftliche Gemeinschaft normativ wenig integriert sein, aber auch selten Anlaß zu Konflikten haben.

Dagegen entspricht der nordöstliche Quadrant (2) weitgehend dem Typus der Kuhnschen Normalwissenschaft mit geordneten Forschungsprioritäten und hohem paradigmatischem Konsens. Hier geht eine hohe Interdependenz der Forschungsaktivitäten mit niedriger Aufgabenungewißheit einher. Dies spricht für geringe, doch kumulative Wissensfortschritte im Rahmen eines weitgehend routinisierten »puzzle solvings«, bei dem die eng aufeinander bezogenen Forschungsaktivitäten »positiv koordiniert« (Mayntz/Scharpf 1975; Scharpf 1993) sind. Die Forschungsaufgaben lassen sich gut vorausplanen und delegieren, und Spezialisierung wird im Dienst übergeordneter Ziele stehen. Das Feld wird über einheitliche theoretische und methodische Standards verfügen, seine organisatorische Struktur wird dem mechanischen Modell von Burns und Stalker (1966) entsprechen und einer professionell integrierten Bürokratie mit deutlich sichtbaren und stabilen Reputationszentren gleichkommen. Es wird weitgehend hierarchisch stratifiziert sein und zugleich eine hohe soziale Kohärenz aufweisen.

Im südöstlichen Quadranten (3) der Matrix wird das mechanische Modell dagegen versagen, und die Koordination der Forschungsaktivitäten wird sich dem organischen Modell von Burns und Stalker (1966) annähern. Hier sind die Forschungsaktivitäten zwar eng aufeinander bezogen, aber ihre Resultate höchst ungewiß. Die Kombination dieser beiden Merkmale hat weitgehend positiv koordinierte Forschungsstrategien und kumulative Wissensfortschritte zu Folge, doch wird das Feld aufgrund der ambivalenten Forschungsergebnisse auch laufend intellektuelle Innovationen produzieren, die nur temporär gültige Konventionen zulassen und zu wechselnden theoretischen und methodischen Standards führen. Seine soziale Struktur wird einer weitgehend horizontal strukturierten Profession gleichkommen, in der sich konkurrierende Schulen und alternierende Reputationszentren herausbilden.

Der Quadrant (4) im Südwesten des Schemas repräsentiert ein Forschungsfeld, das ständig im Fluß ist und ungesteuert evolutioniert. Es ist eine Welt der permanenten Revolutionen, die aber nicht zu kumulativen Wissensfortschritten führen. Als Folge der geringen Interdependenz der Forschungsaktivitäten und gleichzeitig hohen Ungewißheit der Forschungsaufgaben wird hier kein stabiler Konsens über die Forschungsprioritäten und kein einheitliches Paradigma entstehen. Das Feld wird vielmehr laufend theoretische und methodische Innovationen erzeugen, die sich nicht systematisch aufeinander beziehen, in unvorhersehbarer Weise verzweigen und keine Standardisierung zulassen. So wie die Wahl der Forschungsziele auf idiosynkratischen Präferenzen und fluktuierenden Prioritäten beruht, wird sich auch eine heterogene Vielfalt von lokalen und konkurrierenden Standards herausbilden,

deren Selektion von kontingenten Prozessen abhängt. Ähnlich wie im Quadranten (1) werden als Folge der geringen wechselseitigen Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten ebenso im Quadranten (4) viele verschiedene Spezialitäten entstehen, deren Grenzen sich aber aufgrund der hohen Aufgabengewißheit nicht klar definieren und die sich auch nicht in stabiler Weise negativ koordinieren lassen. Die soziale Organisation des Feldes gleicht einer fragmentierten »adhocracy« mit kaum konturierten Reputationszentren. Es ist pluralistisch und weitgehend egalitär strukturiert, schwach koordiniert und integriert und in konzeptuelle Richtungskämpfe verwickelt.

Wie bereits eingangs dieses Kapitels erwähnt, ist dieses Modell bei weitem zu karg und zu schematisch, um die empirische Komplexität der wissenschaftlichen Entwicklung auch nur annähernd erfassen zu können. Aber es erweist sich als eine durchaus »zutreffende Vereinfachung«, die Licht in die basalen funktionalen Zusammenhänge zwischen kognitiven und institutionellen Einflußfaktoren auf diese Entwicklung zu bringen vermag. Es erlaubt Aussagen über die »Organisierbarkeit« der Forschung, markiert die Grenzen von Organisation und läßt sich damit gleichfalls für forschungspolitische Überlegungen fruchtbar machen.

Sowenig wie es einen linearen Zusammenhang zwischen den kognitiven und institutionellen Strukturen der Wissenschaft gibt, sowenig hängen auch die strategischen Optionen der staatlichen Forschungspolitik linear von den kognitiven Bedingungen eines Forschungsfeldes ab. Welche Ziele sich die staatliche Forschungspolitik zueigen macht, wird nicht durch die Wissenschaft, sondern allenfalls in Diskursen zwischen der Wissenschaft und Politik bestimmt und basiert auf kontingenten außerwissenschaftlichen Prozessen und Erwartungsbildungen. Aber unterschiedliche kognitive Bedingungen machen auch einen Unterschied für die Interaktionsbeziehungen zwischen der Wissenschaft und Politik und insbesondere für die Handlungs- und Entscheidungssicherheit der staatlichen Akteure.

Wo eine hohe Standardisierbarkeit des Wissens und der Forschungsstrategien möglich ist, werden sich zugleich stabile Koordinationsnetzwerke zwischen der Politik, Wissenschaft und Wirtschaft herausbilden können, in denen die Ziele und Maßnahmen der Forschungspolitik auf dem Wege von Verhandlungen und Vereinbarungen festgelegt werden. Forschungsfelder von diesem Typus sind potentiell kollektiv handlungsfähig und besitzen im Sinne des netzwerktheoretischen Konzepts von Latour große Chancen, sich die Politik zu einem »Verbündeten« zu machen, die damit ihrerseits über große Handlungs- und Entscheidungssicherheit verfügen wird und die Forschung in stabiler Weise auf bestimmte Ziele ausrichten und organisieren

kann. Dagegen wird auch die Planungs- und Handlungssicherheit der Politik in dem Maße abnehmen, wie in der Wissenschaft selbst kognitive Ungewißheit herrscht. Auf Gebieten mit hoher kognitiver Ungewißheit werden die Netzwerkbeziehungen zwischen Politik, Wissenschaft und Wirtschaft und der Konsens zwischen den beteiligten Akteuren fragil sein. Die kontroversen Kriterien für die Auswahl der forschungsleitenden Fragen, Zielambiguitäten und die hohe Unsicherheit über die Realisierbarkeit der Ziele machen es hier schwierig, die Forschung auf klare Aufgabenstellungen zu bündeln und setzen die forschungspolitischen Entscheidungen in starkem Maße kontingenten Einflußfaktoren aus. Zudem werden einmal gewählte Ziele häufig unintendierte Folgen nach sich ziehen und zu unerwarteten Resultaten und Verzweigungen führen, die sich wiederum destabilisierend auf die forschungspolitischen Koordinationsnetzwerke auswirken. Verhandlungen und Vereinbarungen versagen hier als Koordinationsmechanismen weithin ebenso wie Mittel der bürokratischen Steuerung und Kontrolle.

So »parsimonious« dieses Modell erscheinen mag, so hilfreich erweist es sich dann doch bei dem Versuch, eine Antwort auf die steuerungstheoretische Ausgangsfrage dieser Arbeit zu entwickeln, warum sich die Kernforschung in stabiler Weise als staatliche Großforschung organisieren ließ, während diese Form von Forschungsorganisation im Bereich der Informatik und Informationstechnik weitgehend versagt. Beide Forschungsfelder kommen in ihrem Grundmuster den oben beschriebenen Quadranten (2) und (4) sehr nahe und lassen sich, wie die nun folgenden empirischen Kapitel und die dort enthaltenen Fallstudien zeigen werden, durchaus als Gegenpole auf einem Kontinuum von Aufgabenungewißheit und Aufgabeninterdependenz fassen. Diese Fallstudien liefern gleichfalls Anhaltspunkte dafür, das von Whitley vorgeschlagene analytische Modell zu differenzieren und zu erweitern. So stellt sich vor dem Hintergrund der empirischen Entwicklung beider Felder heraus, daß die Variable Aufgabenungewißheit mindestens in die beiden Dimensionen von Ungewißheit bei der Auswahl der Forschungsziele und Ungewißheit über die Realisierbarkeit dieser Ziele zerfällt. Ähnliches gilt für die Variable Aufgabeninterdependenz, die sowohl die »vertikale« Transferbeziehung zwischen der Grundlagenforschung und Anwendungsforschung als auch die »horizontale«, interdisziplinäre Koppelung von unterschiedlichen Forschungsgebieten umfaßt.²⁴ Für einen Vergleich der Kernphysik und Informatik erweist sich diese Differenzierung des Modells als überaus nützlich.

24 Diesen Hinweis verdanke ich einem Kommentar von Renate Mayntz.

Wie das zweite Kapitel ausführlich zeigen wird, handelt es sich bei der Theorie der Kernspaltung um eine robuste Standardtheorie dieses Phänomens, die erfolgreiches technisches Handeln zuläßt, deren epistemischer Status jedoch bis heute ungeklärt ist. Obwohl in ihren theoretischen und methodischen Ausgangsfragen nach wie vor zerstritten, konnte sich die Physik der Kernspaltung auf der Basis dieser Theorie zu einer Normalwissenschaft und die Gemeinschaft der Physiker zu einer kollektiv handlungsfähigen Profession mit klaren Reputationszentren entwickeln, die letztlich auch dazu in der Lage war, innerhalb eines hoch stabilen atom- und forschungspolitischen Netzwerks die Ziele der kerntechnischen Großforschung klar zu definieren und der staatlichen Forschungspolitik Handlungs- und Entscheidungssicherheit zu vermitteln. Allerdings gibt selbst die Kernphysik ein gutes Beispiel dafür ab, daß unter der Bedingung hoher kognitiver Ungewißheit Verhandlungen und Vereinbarungen als Koordinationsinstrumente rasch versagen. So setzte sich als Folge hoher Entscheidungsunsicherheit das Design der ersten Generation von Reaktoren auf einem evolutionären Weg und auf der Basis eines klassischen »Lock-in-Prozesses« durch. Erst mit der zweiten Generation reduzierte sich die Ungewißheit sowohl über die Auswahl der Reaktortypen als auch deren Realisierbarkeit auf ein Maß, das eine stabile Bestimmung der Ziele auf der Basis von Verhandlungen und Vereinbarungen und ihre Realisierung im Rahmen eines »vertikal« gerichteten Transferprozesses von der kernphysikalischen Grundlagenforschung zur Anwendungsforschung zuließ. Die organisatorische Struktur der kerntechnischen Großforschung lief damit auf ein bürokratisches und durchaus effizientes Rationalmodell von Forschungsorganisation hinaus.

Mehr noch als die Kernphysik und Kerntechnik entzieht sich die Entstehung und Entwicklung der Informatik und Informationstechnik dem Kuhn'schen Phasenmodell. Der Computer war wie das Phänomen der Kernspaltung eine Entdeckung und ist weder in der Elektronik noch in der Mathematik auf der Basis eines konsolidierten Paradigmas konzipiert worden, sondern über den experimentell-handwerklichen Versuch entstanden, das Rechnen zu rationalisieren. Auch die moderne Softwaretechnik entwickelte sich wie der Computer selbst auf rein experimentell-handwerklichem Weg und ohne jegliches theoretisches Fundament. Die Informatik entstand erst, als sich die Programmierung in wachsende Komplexitätsprobleme zu verstricken begann und sollte diese Technik als eine formale Ingenieurwissenschaft durch wissenschaftliche Methoden vereinheitlichen und normieren.

An dieser Aufgabe ist sie indes größtenteils gescheitert. In der Softwaretechnik ist sehr viel mehr möglich, als sich mit den formalen mathemati-

schen Modellen der Informatik erklären läßt. Diese Technik entwickelt sich nach wie vor weitgehend unabhängig von der formalen Theoriebildung, ist mit der Informatik nur sehr lose gekoppelt und heute in eine völlig unüberschaubare Vielfalt von Anwendungen vorgedrungen, während zugleich auch die Informatik selbst immer vielfältigere theoretische und methodische Deutungen des Computers hervorgebracht hat. Ist die Informatik damit schon weit davon entfernt, die formalen Methoden der Softwaretechnik normieren zu können, so sind durch das Vordringen dieser Technik in immer neue Anwendungsgebiete viele grundlegende Probleme der Programmierung heute nicht mehr von rein formaler Natur, sondern verlangen Wissen, das aus dem Kontext der Anwendungen hervorgeht und über das die Informatik selbst gar nicht verfügt. Demgemäß gibt es auch keine stabilen »Lieferbeziehungen« zwischen der informatischen Grundlagenforschung und der Informationstechnik. Dagegen spielen in der Informationstechnik interdisziplinäre Kooperationsformen eine zunehmend wichtigere Rolle.

Ganz den Annahmen des obigen Modells entsprechend gleicht die soziale Organisation der Informatik heute weitgehend einer fragmentierten Adhocracy. Anders als die Kernphysik war und ist die Informatik nicht kollektiv handlungsfähig, sie weist keine stabilen Reputationszentren auf und zerfällt in eine unüberschaubare Vielzahl von Forschergruppen mit unterschiedlichen theoretisch-methodischen Ansätzen und Forschungszielen. Die Entwicklung der Informationstechnik wird auch weithin nicht durch Verhandlungen und Konsensbildung in korporativen Netzwerken, sondern primär durch evolutionäre und marktförmige Prozesse koordiniert. Während sich in der Kerntechnik stabile Koordinationsnetzwerke herausbilden konnten, und dieses Feld ein geradezu klassisches Beispiel der korporativen Regulierung und kooperativen Standardisierung ist (Czada 1992, 1993; Voelzkow 1996), in der die technische Normierung »top down« erfolgt, entstehen die Standards der Informationstechnik in aller Regel »bottom up« und auf evolutionären Wegen. Die immensen theoretischen und methodischen Möglichkeiten, informationstechnische Systeme zu modellieren, machen die Verhandlungsprozesse in und zwischen den entsprechenden Standardisierungsorganisationen äußerst schwierig und lassen eine Konsensbildung häufig nicht zu (Genschel 1995: 161–189). Da die Informationstechnik aber zugleich eine Technik von Netzwerkexternalitäten ist, hat dieser Mangel an verlässlichen wissenschaftlichen Standards zur Folge, daß die Normen und Konventionen auf diesem Gebiet ganz überwiegend durch rein häufigkeitsabhängige »Lock-in-Prozesse« (Arthur 1989) entstehen, die unter wissenschaftlich-technischen Gesichtspunkten meist zu stark suboptimalen Resultaten führen.

Der kognitiven Struktur der Informatik entsprechend litt auch die informatische Großforschung von Beginn an unter einer hohen Ungewißheit der Forschungsaufgaben und starken Zielambiguitäten. Sowenig wie sich die Frage: »What is a computer or what should it be?« (Mahoney 1992: 349) jemals klar beantworten ließ, sowenig ist jemals Klarheit über die Aufgaben der informatischen Großforschung entstanden. Als Folge der weitgehenden Entkoppelung der softwaretechnischen Entwicklung von der wissenschaftlichen Theoriebildung konnte die informatische Großforschung bis heute keine stabilen Transferbeziehungen zu ihren wirtschaftlichen Adressaten aufbauen und ist auch in kein stabiles Koordinationsnetzwerk eingebunden. Ihre Zielsetzungen fluktuierten ständig und wurden immer wieder revidiert. Viele ihrer Ziele erwiesen sich als nicht realisierbar oder sind durch neue Entwicklungen entwertet worden, und ihre Produkte scheiterten nicht selten an den faktischen Standards der Softwaretechnik, die sich in globalen und marktgesteuerten Prozessen durchsetzen.

Im Unterschied dazu hat sich das Modell der anreizfinanzierten Auftrags- oder Vertragsforschung, wie es im organisatorischen Rahmen der Fraunhofer-Gesellschaft praktiziert wird, den Bedingungen der hohen kognitiven Ungewißheit auf dem Feld der Informatik und Informationstechnik als wesentlich angemessener erwiesen. Dieses Modell von Forschungsorganisation gewährt den Akteuren »vor Ort« weitgehende Autonomie in der Wahl ihrer Ziele und Mittel und strebt im übrigen keine vertikale Integration von Grundlagenforschung und technischer Entwicklung an, wie dies die Großforschung tut. Es ist ein Adressatenmodell von Forschungsorganisation, bei dem sich die Forschung unmittelbar am Bedarf der industriellen Anwender orientiert und ihre Ziele in enger Kooperation und Interaktion mit den Auftraggebern entwickelt. Es läuft damit auf eine forschungspolitische Kontextsteuerung hinaus (Willke 1983; Teubner/Willke 1984), bei der die staatliche Politik auf hierarchische Vorgaben verzichtet und die Funktion erfüllt, die Forschung und Entwicklung gewissermaßen zur Selbstorganisation und Selbststeuerung zu befähigen (Hohn/Schimank 1990: 271–331).

Kapitel 2

Wege und Irrwege der Kernphysik

2.1 Der Aufstieg einer »small science« zur »big science«

Obwohl Thomas Kuhn sein Modell der wissenschaftlichen Entwicklung nicht zuletzt am Beispiel der Kernphysik gewonnen hat, präsentiert sich deren Geschichte empirisch keineswegs als eine lineare Abfolge von paradigmatischen Stadien, in denen dieses Forschungsfeld schließlich zur Anwendungsreife gelangte. Es gibt keinen geradlinigen Weg von der Entdeckung der Radioaktivität zur Modellierung des Atoms beziehungsweise seines inneren Aufbaus und von dort zur Kernspaltung. Soweit dies heute in Lehrbüchern und historischen Darstellungen behauptet wird, handelt es sich um retrospektive Rationalisierungen der tatsächlichen Entwicklungen, die der kernphysikalischen Theoriebildung nachträglich eine Rolle zuweist, die sie nie gespielt hat.

Die Kernspaltung war kein theoretisch erwartetes Phänomen. »Die Uran-spaltung wurde nicht entdeckt auf Grund einer theoretischen Vermutung. Es gab keine« (Brix 1989: 46).²⁵ Sie war die unerwartete Entdeckung einer kleinen internationalen Gemeinschaft von Atomphysikern, die keine technischen Ziele verfolgten, sondern die Struktur der »letzten« Grundbausteine der Materie zu erklären suchten.²⁶ Die Forschung dieser wissenschaftlichen Gemeinschaft wurde in der Öffentlichkeit, der Politik und der Wirtschaft kaum beachtet, und erst durch die Entdeckung der Kernspaltung stiegen die beteiligten Wissenschaftler nach dem Zweiten Weltkrieg zu einer wissenschaftlichen und forschungspolitischen Führungselite auf.

25 So auch Hiebert: »There seems to be virtually no evidence, barring hindsight, to support the view that nuclear theory, in 1938, was prepared to accommodate anything akin to nuclear fission« (1988: 75).

26 Eine Dokumentation des aktuellen Stands der Diskussion in der Atomphysik kurze Zeit vor der Entdeckung der Kernspaltung liefert die Arbeit von Weizsäckers (1937).

Innerhalb der Atomphysik galt die Vorstellung, daß sich durch die Umwandlung von Elementen Energie gewinnen ließe, als eine »alchemistische« Idee (Wohlfarth 1979: 4), und die quantenmechanische Modellierung des Atoms und seines inneren Aufbaus hat die Entdeckung, daß Kerne gespalten werden können, sogar lange Zeit verhindert. Die Quantenphysik hat dann auch nach dieser Entdeckung nichts Wesentliches zu ihrer Erklärung beigetragen und spielt für die theoretische Beschreibung der Kernspaltung bis heute so gut wie keine Rolle.

»The ›plan‹ of nuclear physics« bestand John A. Wheeler (1979: 218) zufolge um die Mitte der dreißiger Jahre darin, »the law of force between individual nucleons« aufzufinden. Doch statt dieses ursprünglichen Ziels stand am Ende der dreißiger Jahre plötzlich der »Mechanism of Nuclear Fission« im Mittelpunkt der kernphysikalischen Debatte und »yet not one reference did it make to any detail of the law of force between nucleon and nucleon, nor any hope, desire, or need to find that law« (ebd.: 218).

Nicht die kernphysikalische Theoriebildung, sondern eine ganze Serie von unerwarteten experimentellen Befunden führte in den dreißiger Jahren zur Entdeckung der Kernspaltung. Am Beginn dieser Dekade stiegen die Möglichkeiten, Kernreaktionen experimentell zu studieren, sprunghaft an und die hierdurch ausgelöste

wave of new experimental findings initiated by the discovery of the neutron, including nuclear fission, self-sustaining chain reactions, etc. were surprisingly far removed from anything that had to do with quantum mechanics, the electromagnetic properties, or models of the nucleus. (Hiebert 1988: 75)

Anders als im traditionellen Rationalmodell des Forschungshandelns hat die theoretische Kernphysik das experimentelle Handeln weder angeleitet, noch war sie dazu in der Lage, für dessen Befunde konsistente Erklärungen zu liefern. Für die Experimentatoren »it was not at all difficult to keep surprising the theoreticians« (ebd.: 76). Während die experimentelle Kernphysik kaum Bezug auf die theoretische Diskussion nahm, »the theoreticians, by contrast, were swimming rather aimlessly in a sea of novel experimental phenomena about the nucleus that did not fit readily with any of their theoretical moves« (ebd.: 76).

Ähnlich wie Peter Galison in seiner Untersuchung »How Experiments End« (1987) für die spätere Partikel- und Hochenergiephysik konstatiert, daß die Theoriebildung und die experimentelle Praxis »do not march in lockstep« (ebd.: 13), sondern Theorien an experimentelle Befunde und experimentelle Befunde an theoretische Konzepte angepaßt werden, präsentiert

sich auch die Frühgeschichte der Kernphysik und der Entdeckung der Kernspaltung geradezu als ein Musterbeispiel für diese wechselseitige Angleichung von Theorie und Empirie. »The history of nuclear physics«, so Erwin Hiebert, »in general, provides a paradigmatic example of this situation vis-à-vis the reciprocity that develops between experiment and theory«. ²⁷ Die Theorie der Kernspaltung besitzt eine »self-vindicating structure« und ist durch die nachträgliche Modifikation eines Modells entstanden, das zuvor erklärte, warum dieses Phänomen definitiv ausgeschlossen war.

Der epistemische Status dieses sogenannten »Tröpfchenmodells« ist somit mehr als unklar. Es liefert eine theoretisch nicht befriedigende, anschauliche Deutung von der Struktur des Atomkerns und des Spaltungsprozesses in den Termini der klassischen Physik, von der sich die moderne quantentheoretische Physik der subatomaren Ebene gerade abzulösen suchte. Darüber hinaus kann dieses Modell das Phänomen der Kernspaltung nicht einheitlich deuten und erklärt nur einen Teil der experimentellen Befunde. Trotz seines ungeklärten epistemischen Status wurde es unmittelbar nach der Entdeckung der Kernspaltung ganz im Sinne des von Pierre Duhem (1906) beschriebenen Musters der wissenschaftlichen Konsensbildung als eine Konvention akzeptiert, mit der sich zugleich die »Schließung« der Theoriebildung über dieses Phänomen verband.

Die Theorie der Kernspaltung ist in den Worten von Werner Heisenberg (1984) eine »abgeschlossene Theorie«, die gegenüber einem beschränkten Set von kernphysikalischen Beobachtungen und Daten Gültigkeit besitzt und dort als »richtige« Beschreibung gelten kann, »wo ihre Begriffe angewendet werden können« (ebd.: 77). Sie enthält aber

keine völlig sichere Aussage über die Welt der Erfahrungen. Denn wie weit man mit den Begriffen dieser Theorie die Erscheinungen greifen kann, bleibt im strengen Sinne unsicher und einfach eine Frage des Erfolgs.
(ebd.: 79)²⁸

So war es denn auch nicht sein Wahrheitsgehalt, sondern die »guten Dienste«²⁹ des Modells von Bohr und Wheeler für die technische Nutzung der

27 Vgl. dazu auch die umfang- und detailreiche Studie »Constructing Quarks« von Andrew Pickering (1984).

28 Zum Begriff der »abgeschlossenen Theorie« in den wissenschaftsphilosophischen und erkenntnistheoretischen Betrachtungen Werner Heisenbergs vgl. ausführlich die Arbeit von Catherine Chevalley (1988).

29 Wie dies heute jedes Handbuch zur Atomphysik konstatiert (vgl. Bibliographisches Institut [Hrsg.] 1981: 739).

Kernspaltung, die dazu führten, daß es sich zur bis heute gültigen Standardtheorie dieses Phänomens entwickelte. Dieses Modell lieferte eine robuste theoretische und methodische Basis für die Reaktorphysik, die unmittelbar im Anschluß an die Entdeckung von Otto Hahn als neues Teilgebiet der Kernphysik entstand und auf die sich zeitweise alle Anstrengungen in diesem Gebiet konzentrierten. Es ermöglichte eine theoretisch angeleitete, anwendungsorientierte und kumulative Grundlagenforschung über die Funktionsprinzipien und das Design einer »Uranmaschine« oder »Uranbrenners«, die zu verlässlichen und stabil reproduzierbaren Ergebnissen führte.

Damit konnte sich die Physik der Kernspaltung im Verlauf der Nachkriegsjahre zu einer konsensuellen Normalwissenschaft entwickeln und in eine ingenieurwissenschaftliche Konstruktionslehre von den Kernreaktoren übergehen, wenngleich der »Wahrheitsgehalt« der ihr zugrundeliegenden Theorie nach wie vor unklar blieb. Die Physik der Kernreaktoren hielt keine weiteren Überraschungen bereit, die eine Revision dieser Theorie erforderlich gemacht hätten, und auch von der kernphysikalischen Grundlagenforschung über die »letzten« Bestandteile der Materie gingen keine Irritationen auf die Physik der Kernspaltung aus. Soweit es die Forschung über die Struktur der Kerne betraf, schlug die Nuklearphysik den Weg in die Hochenergie- und Partikelphysik ein, die auf eine Fülle neuer und bis heute ungeklärter Probleme stieß, aus der gleichwohl keine Beiträge hervorgingen, die für das Phänomen der Kernspaltung von Relevanz gewesen wären. Ende der sechziger Jahre war dann das Gebiet der Reaktorphysik weitgehend erforscht und gab keine fundamentalen wissenschaftlichen Rätsel mehr auf. Zu dieser Zeit ging es in eine Domäne von Nuklearingenieuren über, die sich mit der inkrementellen technischen Weiterentwicklung der Anlagen befaßten.

Die Reaktorphysik verfügte aber nicht nur über ein robustes theoretisches und methodisches Standardset, sondern ebenso über ein klares und von Konsens getragenes Leitbild von den optimalen Reaktoren. Wenn man die nuklearen Energievorkommen in vollem Umfang ausschöpfen wollte, und in dieser Frage gab es in den fünfziger und sechziger Jahren nicht die geringsten Zweifel, kamen auf lange Sicht nur Brutreaktoren in Betracht, die neben der Stromproduktion ebenfalls dazu eingesetzt werden konnten, neues Spaltmaterial zu erzeugen. Unter diesen Reaktoren gab es mit dem schnellen Plutonium- und dem thermischen Thoriumbrüter wiederum nur zwei optimale Reaktortypen, die das Potential der Kernenergie am effizientesten nutzten und sich in ihrem Wirkungsgrad eindeutig vom Rest des Feldes absetzten. Da diese Brutkraftwerke allerdings auch die komplexesten reaktorphysikalischen Eigenschaften aufwiesen und einer langfristigen Entwick-

lung bedurften, konnten sie erst das Fernziel einer Kernenergiestrategie sein, die sich diesem Ziel schrittweise über weniger aufwendige »Zwischenlösungen« näherte.

Wenn dennoch Meinungsverschiedenheiten und Konflikte über die Ziele der kerntechnischen Forschung und Entwicklung aufkamen und zeitweise große Verwirrung in dieser Frage herrschte, so war dies auf die unerwartete Vielzahl von Reaktortypen zurückzuführen, die sich in den fünfziger Jahren im Sinne solcher »Zwischenlösungen« anboten. Deren Vielfalt und die fehlenden Entscheidungskriterien für eine gezielte und sichere Auswahl unter den konkurrierenden Entwürfen entfachten in der zweiten Hälfte dieser Dekade eine geradezu leidenschaftliche Debatte über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Reaktortypen, die parallel zur Selektion der ersten Leistungsreaktoren für die industrielle Stromproduktion einsetzte.

Dies hatte zur Folge, daß die Wahl der ersten Leistungsreaktoren an der Wissenschaft vorbeiging und mit der Leichtwasserlinie im Zuge eines klassischen »Lock-in-Prozesses« auf einen Reaktortyp fiel, der kurz- und mittelfristig die geringsten Kostenrisiken für die Betreiber der Anlagen barg, langfristig aber die schlechteste aller denkbaren Lösungen darstellte. Leichtwasserreaktoren nutzen im Vergleich zu allen anderen Reaktortypen die nuklearen Energievorkommen am wenigsten aus und mußten sich deshalb auf lange Sicht als die teuerste Variante der nuklearen Energieerzeugung erweisen.

Zugleich bereinigte das »lock-in« dieses Reaktortyps aber auch die ungewisse Situation, indem es die forschungspolitischen Akteure gewissermaßen von der Qual der Wahl unter suboptimalen Optionen befreite und die kerntechnischen Entwicklungsziele jetzt definitiv auf den Plutonium- und Thoriumbrüter als die optimalen Reaktortypen reduzierte. Und gerade weil die Wahl der Zwischenlösung auf die schlechteste aller denkbaren Lösungen gefallen war, schien es um so dringlicher, möglichst rasch mit der Entwicklung dieser Reaktortypen zu beginnen.

Damit konnte sich in der Bundesrepublik nun erneut ein breiter Konsens über die Entwicklungsziele der kerntechnischen Forschung zu einem Zeitpunkt herausbilden, als es für die Bundesregierung aus kontingenten forschungspolitischen Gründen möglich und attraktiv wurde, sich in der Förderung der kerntechnischen Forschung sehr viel stärker als bislang zu engagieren und das Modell der »big science« zu ihrer speziellen forschungspolitischen Domäne zu machen. So sehr diese Entscheidung freilich auch im einzelnen von kontingenten Faktoren abhängig gewesen sein mag, so stabil war dann der Entwicklungspfad und der Erfolgskurs, den die Forschungspolitik des Bundes mit diesem Modell einschlug.

Die beiden verbliebenen Optionen des Plutonium- und Thoriumbrüters ließen sich auf die Kernforschungszentren in Karlsruhe und Jülich aufteilen, die damit jeweils über ein großes integratives Ziel verfügten, zu dem es keine konkurrierenden Alternativen gab und dessen prinzipielle reaktorphysikalische und technische Realisierbarkeit bei aller Komplexität der Forschungsaufgaben nicht in Frage stand. Zugleich konnte sich das zeitweise fragile forschungs- und energiepolitische Netzwerk zwischen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, das über das »lock-in« des Leichtwasserreaktors zunächst auseinanderzufallen drohte, jetzt erneut stabilisieren. Nachdem feststand, daß sich der Leichtwasserreaktor als Standard unter den Leistungsreaktoren der ersten Generation etablieren würde, wandte sich die Industrie weltweit der Entwicklung von »fortgeschrittenen« Brutreaktoren der zweiten Generation zu und eröffnete damit einen internationalen Konkurrenzkampf auf dem Gebiet der Bruttechnologie, in dessen Folge sich die deutschen Anlagenbauer den Projekten in Karlsruhe und Jülich anschlossen.

Wie die Arbeit der beiden Forschungszentren selbst, blieb auch ihre Kooperation mit der Industrie angesichts der stabilen atompolitischen Priorität, die der Entwicklung von Brutkraftwerken im internationalen Wettbewerb der Industrienationen zukam, so gut wie völlig frei von Zielambiguitäten und Zielkonflikten, während die Bonner Forschungspolitik wiederum auf der Basis dieses Zielkonsenses in ebenso stabiler Weise die Koordination der Projekte und Transferprozesse übernehmen konnte. Nach dem Abschluß der explorativen Untersuchungen und der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung, während derer die Projekte unter der Leitung der Physiker standen, ging ihre Koordination auf »hybrid« zusammengesetzte Komitees unter dem Vorsitz der Bonner Regierung über, die den Fortgang der Arbeiten und der Verteilung der Aufgaben zwischen den Kooperationspartnern aus der Forschung und Industrie durch minutiös spezifizierte hierarchische Anweisungen oder Verträge steuerte.

Alles in allem konnte sich damit die Organisation der Forschungs- und Transferprozesse der beiden ersten bundesdeutschen Großforschungseinrichtungen ganz im Sinne des Schemas von Richard Whitley einem bürokratischen Rationalmodell annähern, dessen Effizienz und Erfolg der Forschungspolitik des Bundes gute Gründe dafür lieferte, es auch auf andere wissenschaftliche Felder zu übertragen. Indes waren die Voraussetzungen für die Funktionstüchtigkeit und den Erfolg dieses bürokratischen Modells nie wieder so günstig wie im Falle dieser beiden ersten Einrichtungen. Auf keinem anderen Wissensgebiet, auf dem der Bund nach deren Vorbild später weitere Großforschung gründete, ließen sich die Forschungsziele je wieder

in so stabiler Weise bestimmen und die Forschungsaufgaben mit so großer Sicherheit identifizieren und festlegen wie im Fall der Kerntechnik und Reaktorphysik.

2.2 Start und Stagnation der Kernphysik

Noch am Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts galten als Atome alle Substanzen, die sich auf mechanischem und chemischem Wege nicht weiter zerteilen ließen. Dieser Theorie zufolge baute sich die Materie aus insgesamt 92 kleinsten, unteilbaren Elementen auf, die sich jeweils nicht in ein anderes Element umwandeln konnten. Erst die eher zufällige Entdeckung der X- beziehungsweise Röntgenstrahlen durch Wilhelm Conrad Röntgen im Jahr 1895 und die experimentelle Untersuchung dieser Strahlung führte von dieser chemischen Atomtheorie zur modernen Atom- und Kernphysik.³⁰

Als Antoine Henri Becquerel 1896 im Anschluß an Röntgens Entdeckung herausfand, daß auch Uransalze eine neue Art von Strahlung aussandten und photographische Platten zu schwärzen vermochten, führte dies gegen Ende des Jahrhunderts zu der Deutung, daß die radioaktiven Strahlen, die sich weder durch chemische noch mechanische Mittel beeinflussen ließen, aus dem Inneren der Atome stammen mußten. Wie der radioaktive Zerfall von Uran und Thorium zeigte, wandelten sich diese Elemente durch die Emission von Röntgenstrahlen in andere Elemente um. Die Atome waren also nicht unteilbar und konnten nicht die letzten Elemente der Materie sein. Außerhalb des engen Kreises der Naturwissenschaftler und Physiker, die sich mit dem Phänomen der Radioaktivität befaßten, galt diese Schlußfolgerung jedoch noch lange Zeit als »Ausgeburt eines kranken Hirns« (Lummer 1912: 220) und wurde erst etwa zwanzig Jahre später, insbesondere in der Folge der Arbeiten des Ehepaars Curie in Frankreich und des britischen Physikers Ernest Rutherford, allgemein akzeptiert.

Marie und Pierre Curie untersuchten 1898 systematisch alle Atome auf Radioaktivität und entdeckten dabei zwei neue Elemente, die sie als Polonium und Radium bezeichneten und deren Strahlungsintensität millionenfach stärker war als die des Urans. Ein Jahr später stellte Ernest Rutherford fest,

30 Vgl. Wohlfahrt (1979: 1–2). Röntgen war bei Experimenten mit Kathodenstrahlen wie zuvor bereits W. Crooks und andere auf deren fluoreszierende Wirkung gestoßen. Crooks hatte aber mit seinen Berichten über dieses Phänomen zunächst keine Beachtung gefunden.

daß die »Uranstrahlung« aus zwei Komponenten bestand, die sich in ihrem Vermögen, Materialien zu durchdringen, unterschieden. Die leichter absorbierbare Strahlung nannte er Alpha-, die durchdringendere Strahlung Beta-Strahlung. Paul Villard schließlich identifizierte im Anschluß an Rutherfords Befunde mit den Gamma-Strahlen eine dritte Strahlungsart, die zusammen mit der Alpha- und Beta-Strahlung auftreten konnte, sich jedoch von diesen radioaktiven Strahlungsarten darin unterschied, daß sie sich nicht durch magnetische Felder ablenken ließ. Während sich die Gamma-Strahlen wenige Jahre später als kurzwellige elektromagnetische Strahlung bestimmen ließ, erwiesen sich die Beta-Strahlen als elektrische Ströme energiereicher Elektronen. Die Alpha-Strahlen zu identifizieren, stellte sich als schwieriger heraus und nahm längere Zeit in Anspruch. Rutherford konnte erst 1909 zeigen, daß sie aus zweifach positiv geladenen Heliumionen bestanden (vgl. dazu ausführlicher Brix 1989).

In seinen berühmten Streuexperimenten untersuchte Rutherford dann zusammen mit Hans Geiger die Bahnen, die Alpha-Teilchen auf ihrem Weg durch Materie nahmen und stieß dabei auf eine Anomalie, die ihn zur Annahme eines Atomkerns führte. Wie Geiger in vielen Untersuchungsreihen experimentell festgestellt hatte, waren die Bahnen, die Helium-Atome nahmen, wenn sie Materie durchdrangen, fast geradlinig. Viele minimale Richtungsänderungen hatten eine nur kleine Vielfach-Ablenkung zur Folge. Wenn man jedoch, wie Geiger und Marsden herausfanden, eine hauchdünne Metallfolie mit Alpha-Teilchen beschoß, wurde eins von etwa zehntausend zurückgeworfen. Geiger und Marsden dokumentierten und publizierten diesen »unverständlichen Effekt« (Brix 1989: 42) im Jahr 1909, doch »fast zwei Jahre lang fing niemand etwas damit an« (ebd.: 42).

Im Jahre 1911 entwickelte dann Rutherford einen theoretischen Ansatz, der diesen Effekt erklärte. Wenn das Gewicht der Atome in einem winzigen elektrisch geladenen Kern tief in seinem Mittelpunkt konzentriert war, konnte ein einziger Treffer auf diesen Kern die starke Ab- und Rücklenkung des Alpha-Teilchens bewirken, die Geiger und Marsden beobachtet hatten. Ihm gelang es 1912, diese Vermutung experimentell mit Hilfe einer von Geiger entwickelten Versuchsanordnung zu bestätigen, durch die sich der Ablenkwinkel der Alpha-Teilchen bestimmen ließ. Im Jahr 1913 schlug Rutherford dann ein Modell des Atoms vor, wonach es aus einem positiv geladenen Kern besteht, der fast seine gesamte Masse ausmacht und der von einer Hülle negativ geladener Elektronen in relativ großer Entfernung um-

geben wird. Die negative Ladung der Elektronen kompensiert die des positiv geladenen Kerns, so daß die nicht ionisierten Atome elektrisch neutral sind.³¹

Rutherford war es auch, der als erster die Idee verfolgte, daß sich die Alpha-Teilchen als Geschosse nutzen lassen mußten, um Kerne experimentell zu manipulieren und die in der Natur spontan auftretenden Kernumwandlungen im Labor zu erzeugen. Im Jahr 1919 leitete er die erste künstliche Atomumwandlung ein, indem er Stickstoff mit Alpha-Teilchen bestrahlte und als Reaktionsprodukte ein Sauerstoffatom und hochenergetische Wasserstoffkerne erhielt. In der Folge dehnte er seine Untersuchungen auf andere Elemente aus und fand nach dem Beschuß mit Alpha-Teilchen ebenfalls stets Wasserstoffkerne. Der Atomkern des Wasserstoffs, den Rutherford als Proton bezeichnete, mußte also zugleich Bestandteil aller anderen Atomkerne sein. Dies führte in der Atomphysik bis zum Beginn der dreißiger Jahre zu der Annahme, daß die Materie mit den Elektronen und Protonen aus genau zwei »Grundbausteinen« bestand.

Allerdings ließ sich weder die Stabilität der Elektronenhülle noch die des Atomkerns mehr mit den Mitteln der klassischen Physik erklären. So mußten die Elektronen auf ihren Kreisbahnen um den Kern nach den Gesetzen der Elektrodynamik eigentlich fortwährend Energie in Form von elektromagnetischen Wellen abstrahlen und im Bruchteil einer Sekunde auf Spiralbahnen in den Kern stürzen.

Aber auch die Stabilität des Kerns selbst ließ sich nicht befriedigend erklären, da sich die positiv geladenen Protonen dem Coulombschen Gesetz zufolge ja wechselseitig abstoßen mußten. Schließlich handelte es sich um ein unerklärliches Phänomen, daß beim radioaktiven Zerfall der Kerne als Isotope bezeichnete Produkte entstanden, die sich chemisch nicht abtrennen ließen und die gleiche periodische Ordnungszahl aufwiesen, dennoch unterschiedlich schwer waren.

Die Erklärungsprobleme, die bei der Frage auftauchten, warum sich die Elektronenhülle stabil verhielt, versuchte Niels Bohr 1913 aus dem Weg zu räumen, indem er das Rutherfordsche Atommodell mit der Quantenhypothese Max Plancks verband. Bohrs Versuch markierte den Beginn der modernen Quantenphysik, die sich von der Vorstellung der klassischen Physik ablöste, daß physikalische Prozesse kausal und kontinuierlich verlaufen, und zur

31 Dennoch schlugen die empirischen Befunde und theoretischen Schlußfolgerungen von Rutherford, Geiger und Marsden »keineswegs wie eine Bombe ein« (Brix 1989: 42). »Noch zweieinhalb Jahre später referierte ein Nobelpreisträger auf einer berühmten Konferenz über die »Struktur des Atoms«, ohne den Kern zu erwähnen« (ebd.: 42).

Modellierung des Atoms und seines inneren Aufbaus auf das Konzept der Planckschen Wirkungsquanten zurückgriff. Dieser Ansatz führte bei der Erklärung der Atomhülle rasch zu kumulativen Fortschritten, die hoffen ließen, daß in gleicher Weise der Aufbau des Atomkerns und die dort wirkenden Kräfte sehr bald quantenphysikalisch erklärt werden konnten.

Bohr postulierte zunächst, daß sich die Elektronen nicht auf allen der klassischen Physik zufolge möglichen Kreisbahnen um den Kern bewegen, sondern nur auf bestimmten, sogenannten Quantenbahnen, auf denen sie keine Energie abstrahlen. Sie emittieren nur dann Energie, wenn sie zwischen diesen »erlaubten« Bahnen in einem Elektronen- oder Quantensprung wechseln. Dies erklärte neben der Stabilität der Elektronenhülle auch das bis dahin unverstandene Linienspektrum des Wasserstoffatoms. Im Jahr 1915 griff Sommerfeld den Vorschlag von Bohr auf und entwickelte ihn zu einem Modell weiter, in dem die Elektronen sich auf elliptischen Bahnen beziehungsweise Rosettenbahnen um den Kern bewegen.

Dies führte Bohr wiederum 1925 zu einem Schalenmodell der Atome, das eine Deutung der Systematik des periodischen Systems erlaubte, und in dem die Zahl der Elektronen in der äußersten Schale ihre jeweiligen chemischen Eigenschaften ausmachen. Das sogenannte Bohr-Sommerfeldsche Atommodell ließ sich jedoch nur auf eine begrenzte Zahl von empirischen Phänomenen anwenden und versagte insbesondere bei der Erklärung der Spektrallinien von komplizierteren Atomen als denen des Wasserstoffs.

Aus den inneren Widersprüchen dieses Modells zog dann Werner Heisenberg die Konsequenz, Begriffe wie Teilchenbahn, Teilchenort und Bahngeschwindigkeit der Elektronen, die noch aus der klassischen Physik stammten, als unbeobachtbare physikalische Größen ganz aufzugeben. Heisenberg entwickelte 1925 mit der sogenannten Matrizenmechanik einen mathematisch-physikalischen Formalismus, durch den sich die Struktur der Elektronenhülle quantenmechanisch vollständig erklären ließ und der exakte quantitative Werte für die chemischen beziehungsweise festkörperphysikalischen Eigenschaften der Atome lieferte, jedoch keine anschauliche Vorstellung von den atomaren Vorgängen mehr erlaubte.

Erwin Schrödinger legte im Jahr darauf mit der Wellenmechanik eine der Heisenbergschen Matrizenmechanik inhaltlich äquivalente quantenmechanische Lösung vor. Die Wellenmechanik bietet ein Modell des Atoms, in dem der Ort des Elektrons nicht mehr genau, sondern nur durch eine räumliche Verteilungswahrscheinlichkeit angegeben werden kann. Beide Formalismen sind aber lediglich unterschiedliche mathematische Darstellungen ein und derselben quantenmechanischen Beschreibung der Atomhülle.

Diese raschen theoretischen Fortschritte der frühen Atomphysik ließen, wie Rudolf Peierls rückblickend feststellt, die wissenschaftliche Gemeinschaft zunächst glauben, »that physics was almost finished« (Peierls 1979: 186) und man auch bei der Modellierung des Aufbaus der Atomkerne kurz vor dem Durchbruch stand.

In the development of quantum mechanics fundamental problems had been resolved so quickly that it was natural to think that the next step might be the last. Some started to discuss what they do after physics was complete.
(ebd.: 186)

Tatsächlich aber erwies sich die Struktur der Kerne als ein sehr viel schwierigeres Rätsel als die der Atomhülle.

Ähnlich wie Bohr quantenmechanische Bedingungen in das Rutherford-sche Atommodell eingeführt hatte, um die im Rahmen der klassischen Physik unbegreifliche Stabilität der Elektronenhülle zu erklären, wandte George Gamow im Jahr 1927 erstmals die Quantentheorie auf das nach klassischem Verständnis ebenfalls unverständliche Phänomen der Stabilität des Kerns und des stufenweisen Zerfalls der Alphateilchen an. Da sich die positiv geladenen Protonen im Kern des Atoms dem Coulombschen Gesetz zufolge abstoßen mußten, nahm George Gamow an, daß es neben den in der klassischen Physik bekannten Kräften der Gravitation und elektromagnetischen Wechselwirkung eine weitere und später als starke Wechselwirkung bezeichnete anziehende Kraft zwischen den Bestandteilen des Kerns geben mußte, die die Coulombschen Kräfte überwog. Er gelangte damit zu einem Vorläufer des späteren Tröpfchenmodells von Niels Bohr, bei dem der Atomkern in Analogie zu einem Flüssigkeitströpfchen durch die Oberflächenspannung zusammengehalten wurde, die von den anziehenden Kernkräften und der abstoßenden elektromagnetischen Wechselwirkung ausging.

Dieses Modell erlaubte es Gamow, eine quantenmechanische Theorie des Alpha-Zerfalls zu entwickeln, mit der sich die sogenannte Geiger-Nuttal-Beziehung erklären ließ. Die Geiger-Nuttal-Beziehung beschrieb einen empirischen Zusammenhang zwischen der Energie und der Halbwertszeit von Alphastrahlen, die Gamow auf den sogenannten Alpha-Tunnel-Effekt zurückführte. Dieser Effekt lieferte eine quantenmechanische Begründung für die bisherigen experimentellen Beobachtungen, daß bei Kernreaktionen nie schlagartig große Mengen von Alphateilchen freigesetzt wurden, sondern die Zerfallsprozesse und Kernumwandlungen immer stufenweise vor sich gingen. Gamows Theorie zufolge beruhte dies auf quantenmechanischen Potentialschwellen zwischen den bindenden und abstoßenden Kräfte inner-

halb des Kerns, die den im Rahmen der klassischen Physik unverständlichen Vorgang ermöglichten, daß die Alphateilchen Potentialwälle höherer Energie, als sie selbst besaßen, gewissermaßen durchtunneln konnten.

Gamows quantenmechanische Interpretation des Alpha-Zerfalls fand große Beachtung und wurde von der kernphysikalischen Gemeinschaft sofort akzeptiert, obwohl seine Theorie nichts über die Natur der von ihm angenommenen Kernkräfte aussagte. Vorerst schien nur klar, daß eine unbekannte Wechselwirkung zwischen den Protonen existieren und deren Potential höher als das der elektromagnetischen Kräfte sein mußte. Von der Aufklärung dieser Wechselwirkung war die Kernphysik freilich weit entfernt. Zudem vermochte Gamows Theorie der Potentialschwellen nur die Stabilität leichter Kerne zu erklären, aber »no detailed modell of a heavy nucleus could be conceived that would hold together« (Hiebert 1989: 62).

Ebenso blieb die Bildung der Isotope, die beim radioaktiven Zerfall entstanden, rätselhaft. Diese Zerfallsprodukte hätten sich allenfalls dann erklären lassen, wenn man annahm, daß sich das Atom nicht nur aus Elektronen und Protonen, sondern zusätzlich aus einem elektrisch neutralen Teilchen zusammensetzte, das seinerseits als eine Art »neutral doublet« wiederum aus einem Proton und einem Elektron bestand. Die Existenz eines solchen neutralen Teilchens schied jedoch in den zwanziger und frühen dreißiger Jahren aus theoretischen Gründen noch aus.

Zwar hatte Rutherford 1920 in seiner »Bakerian Lecture to the British Association for the Advancement of Science« darüber spekuliert, daß auch der Atomkern möglicherweise Protonen und Elektronen enthielt und die Kernelektronen einen Teil der Protonen neutralisierten. Aufgrund einer unterschiedlichen Anzahl von Kernelektronen hätten so verschieden schwere Atomkerne mit gleicher Kernladung entstehen können. Diese Vorstellung stand jedoch im Widerspruch zur Quantenmechanik, die freie Elektronen innerhalb des Kerns ausschloß. Daher befaßte sich in den zwanziger und frühen dreißiger Jahren auch niemand mit der Frage nach der Existenz eines »neutral doublets« oder Neutrons.

Nach den anfänglich raschen Erklärungserfolgen, die sich durch die Anwendung der Quantenmechanik auf die Elektronenhülle eingestellt hatten, überwog um 1930 in der Gemeinschaft der Kernphysiker angesichts der Probleme, die sich bei der Aufklärung des inneren Aufbaus des Atome auftraten, die Furcht, in eine Sackgasse geraten zu sein. Bohr stellte 1930 eine Art Bilanz der bisherigen Diskussion auf und stellte fest, daß die Kernphysik nicht einmal dazu in der Lage war, in befriedigender Weise die Kräfte zu beschreiben, die leichte Kerne zusammenhielten, und »on passing from the

helium nucleus to heavier nuclei, the problem of constitution became much more complicated« (Hiebert 1989: 59). Sein Optimismus, daß die Quantentheorie rasch zur Aufklärung der Struktur der Kerne und der Kernkräfte führen werde, war zu diesem Zeitpunkt einer tiefen Skepsis gewichen. »The present formulation of quantum mechanics«, stellte Bohr fest, »fails essentially«. ³² Fortschritte bei der Erklärung der Struktur der Kerne und der Natur der Kernkräfte erwartete er jetzt in erster Linie von experimentellen Untersuchungen, gestand aber zugleich ein, daß die Theoretiker den Experimentatoren keinen klaren Weg zu weisen wußten und riet seinem Auditorium, sich auf Überraschungen einzustellen, die sowohl zur Revision von klassischen wie quantenphysikalischen Annahmen über den Aufbau der Kerne führen konnten (ebd.: 59–60).

Tatsächlich stellte sich dann nur zwei Jahre später eine ganze Serie von experimentellen Überraschungen ein. Das Jahr 1932 war das »annus mirabilis« der Kernphysik, das die »glücklichen dreißiger Jahre« (Bethe 1997) dieser Disziplin einleitet. In dieser Dekade nahm die Kernphysik in der Folge neuer experimenteller Methoden und unerwarteter Entdeckungen einen neuen Aufschwung, wenngleich diese Entdeckungen die kernphysikalische Theoriebildung nicht einfacher machten und statt zu einer kohärenten Theorie des Kerns und der Kernkräfte zu einer Vielfalt von konzeptionellen Ansätzen führten.

2.3 Experimentelle Innovationen – die »glücklichen dreißiger Jahre«

Die Serie der experimentellen Überraschungen setzte 1930 mit den Versuchen von Walther Bothe und Herbert Becker an der physikalischen Reichsanstalt in Berlin ein, die Beryllium mit Alpha-Teilchen beschossen und damit eine stark durchdringende Strahlung erzeugten, die sie für Gamma-Strahlung hielten. Zu dem Ergebnis, eine außergewöhnlich starke Gamma-Strahlung erzeugt zu haben, gelangten auch Irène Curie, die Tochter von Marie und Pierre Curie, und ihr Ehemann Frédéric Joliot, die im selben Jahr Paraffin dem Beschuß durch Alpha-Teilchen aussetzten und dabei feststellten, daß aus dieser wasserstoffreichen Substanz in großem Maßstab Proto-

32 So in seiner »Faraday Lecture« über »Quantum Theory of Atomic Constitution« von 1930, zitiert nach Hiebert (1989: 59).

nen entweichen. Curie und Joliot führten diesen unerwarteten Effekt auf die Theorie von Arthur Holly Compton zurück, der 1923 ein quantentheoretisches Modell für die Streuung von Elektronen entwickelt hatte, zu dem sich das Entweichen der Protonen aus dem von ihnen bestrahlten Paraffinblock analog zu verhalten schien.

Zur allgemeinen Verblüffung publizierte die Zeitschrift »Nature« dann jedoch 1932 unter dem Titel »Possible Existence of a Neutron« eine kurze Notiz von James Chadwick, die sich kritisch mit der quantentheoretischen Interpretation der experimentellen Befunde von Bothe und Becker beziehungsweise Curie und Joliot auseinandersetzte (Chadwick 1932a). In dieser Notiz, der drei Monate später mit »The Existence of the Neutron« (Chadwick 1932b) ein Aufsatz in den »Proceedings of the Royal Society« folgte, behauptete Chadwick »all evidence is in favour of the neutron, while quantum hypothesis can only be upheld if the conservation of energy and momentum be relinquished at some point« (Chadwick 1932a: 312). Chadwick hatte neben Wasserstoff auch Stickstoff mit Alpha-Teilchen bestrahlt und aus der Rückstoßenergie geschlossen, das die von Curie und Joliot als Gamma-Strahlung identifizierte Strahlungsart aus Teilchen bestand, die etwa die gleiche Masse wie Protonen besaßen und aufgrund der Leichtigkeit, mit der sie Materie durchdrangen, elektrisch neutral sein mußten.

Die von ihm entdeckte neue Strahlungsart wies damit genau die Eigenschaften auf, die Rutherford für das »neutral doublet« postuliert hatte. Diese Partikel ließen sich mit den nur für Gamma-Strahlung empfindlichen Zählern von Bothe und Becker beziehungsweise Curie und Joliot allerdings nicht identifizieren, während Chadwick sie mit einem Röhrendetektor nachweisen konnte. Sein experimenteller Befund löste in der Gemeinschaft der Kernphysiker zunächst ungläubiges Staunen aus, wurde jedoch dann unmittelbar auch von Bothe, Becker, Curie und Joliot akzeptiert.

Das Jahr 1932 als »annus mirabilis« der Kernphysik hielt aber noch eine Reihe weiterer experimenteller Überraschungen bereit, die das Bild vom Aufbau der Kerne nur noch verwirrender machten. Noch im selben Jahr, als Chadwick das Neutron entdeckte, gelang es C.D. Anderson, das Positron als »Antiteilchen« des Elektrons nachzuweisen. Diese Entdeckung stand im Zusammenhang mit dem theoretischen Postulat eines Neutrinos, das Wolfgang Pauli 1930 aufgestellt hatte. Nachweisen ließ sich das Neutrino allerdings erst in den späten fünfziger Jahren. Ebenfalls im Jahr 1932 brachten J.D. Cockcroft und E.T.S. Walton Protonen mit Hilfe eines elektrostatischen Beschleunigers auf so hohe Energien, daß sie mit Lithiumkernen reagierten und zu deren Desintegration führten. Zur selben Zeit erzeugten E.O. Law-

rence und M.S. Livingston in Berkeley die ersten Kernumwandlungen mit Hilfe eines Zyklotrons. H.C. Urey, F.G. Brickwedde und G.M. Murphy schließlich entdeckten 1932 das Deuterium, das von nun an ebenso als Projektile zur Erzeugung von Kernreaktionen verwandt wurde. Curie und Juliot stellten 1934 dann ungewollt die ersten künstlichen radioaktiven Isotope her, indem sie Bor, Magnesium und Aluminium mit Alphateilchen bestrahlten und zu ihrer Überraschung feststellten, daß die Proben auch nach der Bestrahlung noch radioaktiv waren. Damit war bereits eine Vielzahl von Kernreaktionen bekannt, lange bevor sie sich theoretisch sinnvoll deuten ließen.³³

Der wichtigste experimentelle Befund des Jahres 1932 allerdings war zweifellos die Entdeckung des Neutrons. Doch auch dieser Befund führte nicht auf einem geradlinigen Weg zum Phänomen der Kernspaltung, geschweige denn zu der theoretischen Prognose, daß Kerne unter dem Beschuß von Neutronen zerplatzen können. Soweit es die kernphysikalische Theoriebildung betraf, zog Chadwicks Entdeckung »a great outpouring of theoretical discussions about nuclear forces and models of the nucleus« (Hiebert 1989: 68) nach sich, da sich die Frage nach den Kernkräften völlig neu stellte, wenn das Neutron Bestandteil des Kerns war.

Zudem war man dazu gezwungen, das Neutron entweder als ein eigenständiges drittes Elementarteilchen zu betrachten, oder freie Kernelektronen für den Fall anzunehmen, daß es sich um ein aus Protonen und Elektronen zusammengesetztes »neutral doublet« handelte. Schon Chadwick selbst hatte zwar die Möglichkeit in Betracht gezogen, »that the neutron may be an elementary particle« (Chadwick, zitiert nach Peierls 1979: 184), diese Frage aber offen gelassen, da es der kernphysikalischen Gemeinschaft zum damaligen Zeitpunkt noch sehr schwer fiel »to accept the idea that the neutron was as elementary as the proton« (Peierls 1979: 184). Nachdem Rutherford ursprünglich von einem »neutral doublet« gesprochen hatte, »it was not so easy to accept, that there were only neutrons and protons, particularly that there were no electrons« (ebd.: 184). Die von der Entdeckung des Neutrons ausgelöste theoretische Diskussion um die Struktur der Kerne und die Natur der Kernkräfte wurde denn auch kontroverser als je zuvor geführt.

Werner Heisenberg eröffnete diese theoretische Diskussion mit seinen noch 1932 erschienenen drei klassischen Aufsätzen »Über den Bau der Atomkerne I, II und III«, in denen er der Frage nachging, welche Kräfte den

33 Dies waren im wesentlichen auch die experimentellen Befunde, die Hans Bethe dazu führten, das Jahr 1932 als »annus mirabilis« und die dreißiger Jahre als die glücklichen Jahre der Kernphysik zu bezeichnen (vgl. Bethe 1979).

Kern zusammenhielten und eine neue quantentheoretische Deutung hierfür vorlegte, in deren Mittelpunkt nun das Neutron als Bestandteil des Kerns stand. Heisenberg nahm eine starke Wechselwirkung zwischen den Protonen und Neutronen an. Sein Erklärungsansatz war jedoch weder frei von inneren Widersprüchen, noch ließ er sich mit den Meßergebnissen von Chadwick in Einklang bringen. Insbesondere ließ er auch offen, ob sich das Neutron aus Protonen und Kernelektronen zusammensetzte oder neben den Protonen und Elektronen als drittes eigenständiges Elementarteilchen zu betrachten war.

Heisenbergs Beitrag löste diesmal heftige Kritik vor allem durch Dimitri Iwanenko, Ettore Majorana und Eugen Wigner aus, die jedoch wiederum selbst konkurrierende Modelle entwickelten, in deren Folge man in der Kernphysik der dreißiger Jahre von den Heisenberg-, Iwanenko-, Majorana- und Winger-Kräften sprach. Die Mehrheit der Kernphysiker neigte dabei dem Modell von Majorana zu, während Heisenbergs Theorie der Kernkräfte erst rund zwanzig Jahre später eine Renaissance erlebte. Glaubte die Gemeinschaft der Kernphysiker noch gegen Ende der zwanziger Jahre sehr bald den Durchbruch schaffen und die Atomphysik gewissermaßen vollenden zu können, so wurde jetzt deutlich, daß man erst am Anfang stand. Max Born eröffnete 1934 eine kernphysikalische Konferenz in London, indem er vermeintlich versehentlich zu einer Tagung über *UNCLEAR PHYSICS* statt *NUCLEAR PHYSICS* einlud (Wheeler 1979: 235).

Die Auffassung, daß es sich beim Neutron um ein eigenständiges drittes Elementarteilchen handelte, setzte sich erst allmählich und auf der Basis eines eher stillschweigenden Konsenses durch. Einer der ersten, der diese Auffassung vertrat, war der italienische Kernphysiker Enrico Fermi, der 1934 Chadwicks Entdeckung zusammen mit Paulis Neutrinohypothese in seine Theorie des Beta-Zerfalls inkorporierte und damit gewissermaßen das Elektron aus dem Kern verbannte. Fermis Deutung des Neutrons fand aber keineswegs unmittelbar Zustimmung, zumal sie nicht frei von inneren Widersprüchen war und dem Postulat einer Fülle von weiteren Elementarteilchen den Weg ebnete, deren Existenz vom kernphysikalischen Mainstream lange Zeit heftig bestritten wurde.

Im Jahr 1935 schlug der japanische Kernphysiker Yukawa mit seiner Mesonenfeldquantentheorie der Kernkräfte und dem Postulat des Mesons, als Teilchen, das die elektrische Ladung zwischen den Protonen und Neutronen vermittelte, ein neues Kapitel in der Entwicklung der Kernphysik auf, das zur Partikelphysik überleitete. Deren Geburtsstunde wird zwar heute meist auf das Jahr 1947 datiert, in dem C.M.G. Lattes, G.P.S. Occhialini und C.F. Powell das Pion entdeckten. Tatsächlich aber reichen die Anfänge der

Partikelphysik bis in die zwanziger und dreißiger Jahre zurück, in denen der Konsens innerhalb der Kernphysik, daß die Elektronen, Protonen und schließlich auch die Neutronen die letzten unteilbaren Einheiten der Atome waren, bereits allmählich zu schwinden begann. Eine Reihe experimenteller »Anomalien«, die sogenannten »Latitüden-Effekte«, und die Entdeckung der kosmischen Strahlung, die sich einer Erklärung durch die vorhandenen kernphysikalischen Modelle entzog, führten zu dem Versuch, deren Paradoxien durch das Postulat weiterer Elementarteilchen zu lösen (vgl. dazu ausführlicher Brown/Hoddeson 1983).

Diese Versuche wurden in der Gemeinschaft der Kernphysiker anfänglich wenig beachtet und dann als rein spekulative Betrachtungen heftig kritisiert. Tatsächlich ließen sich die postulierten Teilchen experimentell nicht nachweisen, bis am Ende der vierziger Jahre eine neue Generation von Beschleunigern und Synchronzyklotronen zur Verfügung stand. Auch Partikel, die bereits in den dreißiger Jahren in der kosmischen Strahlung identifiziert wurden, erwiesen sich später nicht als die prognostizierten Teilchen. Dennoch begann der ohnehin fragile Konsens über die »letzten« Teile der Materie in der Kernphysik zu zerbrechen, die sich gegen Ende des Jahrzehnts mehr und mehr in »local and national groups, with distinctive orientations and esprit« (ebd.: 23) aufzuspalten begann.

Zu den Hauptkontrahenten entwickelten sich in diesem Zusammenhang die nordeuropäisch-deutsche Gruppe der »Idealisten« um Bohr, Pauli, Schrödinger und Heisenberg, die sich für eine mathematische Modellierung der subatomaren Strukturen und Prozesse aussprach, statt neue und möglicherweise nicht vorhandene Bausteine der Materie zu postulieren, und die englisch-italienisch-japanischen »Substantialisten«, die sich um Yukawas Schule gruppierten und einen »phänomenologischen« experimentellen Ansatz verfolgten.

Die Entdeckung der Kernspaltung vollzog sich völlig unabhängig von dieser Entwicklung auf einem Nebengleis der kernphysikalischen Forschung, das von Chadwicks Entdeckung abzweigte. Nachdem Curie und Joliot 1934 auf das Phänomen der künstlichen Radioaktivität gestoßen waren, ging Enrico Fermi noch im selben Jahr der Vermutung nach, daß sich Neutronen in besonderer Weise dazu eignen mußten, Kernreaktionen einzuleiten. Diese elektrisch neutrale Strahlung ließ sich zwar nicht beschleunigen, wurde allerdings gerade aufgrund ihrer elektrischen Neutralität nicht von den Protonen abgestoßen und konnte tief in die Materie eindringen. Fermis experimentelle Untersuchungen, in denen er rund sechzig Elemente mit Neutronen bestrahlte, bestätigten seine Vermutung und zeigten, daß sich

diese Methode vor allem im Falle schwerer Elemente dazu eignete, Kernreaktionen zu induzieren. Die bestrahlten Kerne fingen die Neutronen offenbar ein und wandelten sich unter Aussendung von Radioaktivität um.

Durch einen Zufall stellten Fermi und seine Mitarbeiter zudem fest, daß die von ihnen als Projektile benutzten Neutronen abgebremst oder auch »moderiert« wurden, wenn sie hydrogene Substanzen durchdrangen, und die so verlangsamten Neutronen nochmals sehr viel heftigere Reaktionen als die schnellen Partikel hervorriefen. Dies galt vor allem für das Uran, das eine ungewöhnlich hohe Radioaktivität emittierte, wenn man es mit langsamen Neutronen bombardierte.

Tatsächlich hatten die italienischen Kernphysiker mit Hilfe der langsamen Neutronen erstmals Uran gespalten, zogen diese Möglichkeit aber nicht in Betracht, da sie im Widerspruch zur quantenmechanischen Theorie des Alpha-Zerfalls stand. Der Alpha-Tunnel-Effekt, mit dem Gamow so erfolgreich die Geiger-Nuttall-Regel erklärt hatte, schloß eine Spaltung des Urankerns definitiv aus. In Analogie zu den experimentellen Ergebnissen bei leichteren Elementen nahm Fermi deshalb an, daß der Urankern das Neutron einfing und sich durch die Emission von Beta-Strahlen in ein schwereres künstliches Element oder auch Transuran mit der Ordnungszahl 93 umwandelte, das in der Natur nicht vorkam. Ebenso schloß er die Bildung von künstlichen Elementen mit den Ordnungszahlen 94 und 95 nicht aus.³⁴

Fermi und seine Mitarbeiter publizierten ihre Ergebnisse in zehn kurz aufeinanderfolgenden Aufsätzen unter dem Titel »Radioattività Indotta da Bombardamento di Neutroni« und sorgten damit in der Fachwelt für einiges Aufsehen. Ihre experimentellen Befunde gaben den Theoretikern ein schwieriges Rätsel auf, da es schien, daß »the interception of slow neutrons stood at complet variance to the concept of the nucleus then generally accepted« (Wheeler 1979: 253). Wenn die Kerne die Neutronen einfingen, mußte man möglicherweise annehmen, daß sie sich wie die Elektronen auf Kreisbahnen um die Protonen bewegten und die Kerne ähnlich wie die Elektronenhülle des Atoms eine Schalenstruktur aufwiesen. Diesem Schalenmodell des Atomkerns, das um die Mitte der dreißiger Jahre durchaus prominente Anhänger hatte, setzte Niels Bohr 1936 jedoch eine Deutung der

34 Grosse und Arguss meldeten zwar aus chemischer Sicht Zweifel an dieser Deutung an und hielten es für wahrscheinlicher, daß sich ein Protactinumisotop gebildet hatte. Otto Hahn und Lise Meitner, die 1918 gemeinsam das Protactinium entdeckt hatten, konnten aber zeigen, daß sich die Zerfallsprodukte der Urankerne diesem Element nicht zuordnen ließen (Wohlfahrt 1979: 9–10).

experimentellen Ergebnisse Fermis entgegen, mit der sich das bis dahin gültige Bild vom Aufbau des Kerns in modifizierter Form aufrechterhalten ließ.

In seinem Aufsatz »Neutron Capture and Nuclear Constitution« verglich Bohr, ähnlich wie dies bereits Gamow getan hatte, den Kern mit einem Flüssigkeitstropfen, der durch seine Oberflächenspannung zusammengehalten wird. Die Stabilität der Kerne ließ sich so als Produkt der anziehenden Kern- und abstoßenden Coloumbkräfte auffassen. Bohr nahm nun aber zusätzlich an, daß Kernreaktionen in zwei voneinander unabhängigen Phasen verlaufen. Wird ein Kern von einem Partikel getroffen, entstand der Bohrschen Theorie zufolge in der ersten Phase ein hoch angeregter intermediärer Compound- oder Zwischenkern, bei dem sich wie bei einem erhitzten Tröpfchen die Anregungsenergie zunächst auf alle Teilchen verteilte und der eine relativ lange Lebensdauer im Vergleich zu der eigentlichen Kernreaktion besaß. Der Zerfall des Kerns erfolgte dann in der zweiten Phase unabhängig davon, wie sich der Compoundkern gebildet hatte, durch konkurrierende und zufällige Prozesse. Die überschüssige Energie des Kerns konnte sich durch Zufall auf ein einzelnes Nukleon konzentrieren, das dann den Kern verließ. Möglich war jedoch auch, daß der Kern seine Anregungsenergie durch die Emission von elektromagnetischer Strahlung verlor und das einfallende Teilchen absorbierte (dazu ausführlicher Wohlfahrt 1979: 27–30).

Bohrs theoretische Erklärung der Fermischen Befunde stand bis zur Entdeckung der Kernspaltung weitgehend gleichberechtigt neben dem Schalenmodell, zog in der kernphysikalischen Gemeinschaft aber zunächst kein größeres Interesse auf sich, da es keinen Beitrag zur Erklärung der Kernkräfte leistete. Erst durch die Entdeckung von Otto Hahn rückte das Bohrsche Tröpfchenmodell dann in nochmals modifizierter Form in das Zentrum der kernphysikalischen Diskussion und drängte zugleich das Schalenmodell in den Hintergrund, das am Beginn der fünfziger Jahre erneut eine Renaissance erlebte. Zu der Entdeckung, daß sich Kerne spalten können, hat freilich auch Bohrs Modell nicht geführt.

Einzig die Physikerin Eda Noddack, die 1925 das Element Rhenium entdeckt hatte, zog die Deutung von Fermi, daß sich durch das Bombardement von schweren Kernen mit Neutronen Transurane bildeten, grundsätzlich in Zweifel. Noddack machte in ihrem Aufsatz »Über das Element 93«, der 1934 in der Zeitschrift »Angewandte Chemie« erschien, darauf aufmerksam, daß sich die Urkerne unter dem Beschuß von Neutronen möglicherweise gespalten hatten. Sie hielt es für wahrscheinlich, »daß bei der Beschießung schwerer Kerne mit Neutronen diese Kerne in mehrere *größere* Bruchstücke zerfallen, die zwar Isotope bekannter Elemente, aber nicht Nachbarn der be-

strahlten Elemente sind« (Noddack 1979 [1934]: 62–63; Hervorh. im Original). Doch kein Kernphysiker schenkte diesem Hinweis Beachtung.

Mit Fermi, der 1938 für die Entdeckung der vermeintlichen Transurane den Nobelpreis erhielt, schloß die gesamte wissenschaftliche Gemeinschaft aus, daß sich Kerne spalten konnten, und Emilio Segrè, einer seiner Mitarbeiter, gestand später ein, »we were completely blind to the possibility of fission« (Segrè 1955: 259). Dies galt gleichermaßen für Curie und Savitch, die 1937 in Paris Fermis Experimente replizierten und seiner Liste von vermeintlichen Transuranen weitere künstliche Elemente hinzufügten. Und es galt zunächst auch für Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Straßmann, die mit ihren experimentellen Untersuchungen am Kaiser-Wilhelm-Institut die Ergebnisse von Fermi ebenfalls bestätigten und abermals neue Transurane fanden. Zwischen 1934 und 1938 entstand damit eine Vielzahl von neuen künstlichen Kernen, die sich später allesamt als Spaltprodukte von Uran und längst bekannte Elemente herausstellten.

2.4 Entdeckung der Kernspaltung und Stabilisierung ihrer theoretischen Deutung

Wenngleich Otto Hahn sich auch lange dagegen sträubte, seinen eigenen Befunden Glauben zu schenken, und seine Entdeckung als »schrecklich« bezeichnete, so tat er dies nicht, weil ihm die technischen und sozialen Konsequenzen dieser Entdeckung bewußt gewesen wären, sondern weil damit die gesamte physikalische Literatur zu den Transuranen mit einem Schlage zu Makulatur wurde und sich zugleich »Gamows großartig bestätigte Formel« (Brix 1989: 46) als falsch erwies. Auch Hahn hatte dem Hinweis von Noddack keine Beachtung geschenkt und bis Ende 1938 nie in Betracht gezogen, daß die schweren Elemente Uran und Thorium zerplatzen konnten. Nicht physikalische Überlegungen, sondern sein Vertrauen in ein spezielles chemisches Verfahren führten ihn zu diesem Schluß. Diesem chemischen Verfahren zufolge war durch den Beschuß des Urans mit Neutronen kein Transuran, sondern Barium entstanden, ein Element mit der Ordnungszahl 56 und damit um fast vierzig Prozent leichter als Uran. Folglich mußten die Urankerne zu mehreren Bruchstücken zerplatzt sein.

Im Dezember 1938 schrieb er an Lise Meitner, die wenige Monate zuvor das faschistische Deutschland hatte verlassen müssen und nach Stockholm zurückgekehrt war:

Es ist nämlich etwas bei den ›Radiumisotopen‹, was so merkwürdig ist, daß wir es nur Dir sagen. ... Aber immer mehr kommen wir zu dem schrecklichen Schluß: Unsere Ra-Isotope verhalten sich nicht wie Ra (Radium; Anmkg. d. Verf.), sondern wie Ba (Barium; Anmkg. d. Verf.). ... Vielleicht kannst Du irgend eine phantastische Erklärung vorschlagen. Wir wissen dabei selbst, daß es eigentlich nicht in Barium zerplatzen *kann*.

(Hahn 1975: 78; Hervorh. im Original)

Als Physikerin stand Meitner Hahns Befund zwar skeptisch gegenüber, mochte es allerdings nicht definitiv ausschließen, daß die Uranatome zerplatzt waren. In ihrem Brief vom 21. Dezember 1938 schrieb Meitner an Hahn:

Eure Radiumresultate sind sehr verblüffend. Ein Prozeß der mit langsamen Neutronen geht und zum Barium führen soll! ... Mir scheint die vorläufige Annahme eines so weitgehenden Zerplatzens sehr schwierig, aber wir haben in der Kernphysik so viele Überraschungen erlebt, daß man nicht ohne weiteres sagen kann: es ist unmöglich. (ebd.: 78)

Nachdem er die Experimente wieder und wieder überprüft und repliziert hatte, sah Hahn dann keine andere Möglichkeit, seine Befunde zu deuten, und kam in seiner Antwort auf Meitners Brief zu dem Ergebnis,

daß die drei genau studierten Isotope gar kein Ra sind, sondern vom Standpunkt des Chemikers aus Ba. ... Wir können unsere Ergebnisse nicht totschweigen, auch wenn sie physikalisch vielleicht absurd sind. (ebd.: 78)

Meitner diskutierte die Möglichkeit, daß Urankerne unter dem Beschuß mit Neutronen zerplatzen konnten, dann wenige Tage später mit dem Physiker Otto Robert Frisch und teilte Hahn am 1.1.1939 mit: »Wir haben Eure Arbeit sehr genau gelesen und überlegt, vielleicht ist es energetisch doch möglich, daß ein so schwerer Kern zerplatzt« (ebd.: 78).

Während Hahn und Straßmann ihren experimentellen Befund Anfang 1939 in der Zeitschrift »Die Naturwissenschaften« publizierten, veröffentlichte Meitner zusammen mit ihrem Neffen, dem deutschen, nach Dänemark emigrierten Physiker Otto R. Frisch, fast zu dem selben Zeitpunkt in »Nature« ein kurzes Papier, in dem die beiden Autoren eine erste theoretische Erklärung für das Phänomen der Kernspaltung vorschlugen. Sie stellten in diesem Papier zunächst fest, daß die quantenmechanische Theorie des Alpha-Zerfalls von Gamow eine Spaltung der Urankerne zwar ausschloß, sich jedoch bei einer entsprechenden Modifikation der Annahmen im Rahmen des Bohrschen Tröpfchenmodells eine plausible Erklärung für dieses Phänomen anbot.

Wenn in einem hochgeladenen Urankern – in dem durch die gegenseitige Abstoßung der Protonen die Oberflächenspannung stark vermindert ist – durch das eingefangene Neutron die kollektive Bewegung des Kerns genügend heftig wird, so kann sich der Kern in die Länge ziehen; es bildet sich eine Art »Taille« und schließlich erfolgt eine Trennung in ungefähr gleich große, leichtere Kerne, die dann wegen ihrer gegenseitigen Abstoßung mit großer Heftigkeit auseinanderfliegen. (Meitner 1963: 168)

Diese Erklärung kam rein mit den Mitteln der klassischen Physik aus, »and without having to consider quantum-mechanical ›tunnel effects‹« (Meitner / Frisch 1939: 239–240). Sie basierte auf ad hoc herangezogenen Annahmen und war theoretisch wenig befriedigend. Die kernphysikalische Theoriebildung hatte es bereits nicht vermocht, die Kernspaltung zu prognostizieren, »nor do we find, even after the discovery, that a convincing theoretical rational for the phenomenon was forthcoming except in an ad hoc and makeshift way« (Hiebert 1989: 55).

Obwohl er kein theoretisch überzeugendes Modell, sondern lediglich eine Hilfskonstruktion für die Erklärung der Kernspaltung lieferte, wurde der Vorschlag von Meitner und Frisch in der kernphysikalischen Gemeinschaft fast augenblicklich akzeptiert. Liefen die experimentellen Fragestellungen und theoretischen Beiträge zuvor weit auseinander, so konzentrierten sich vom Beginn des Jahres 1939 an die Forschungsaktivitäten auf das Phänomen der Kernspaltung, die Entwicklung der »Uranmaschine«. Einer überschlägigen Berechnung von Meitner und Frisch zufolge mußte die kinetische Energie, mit der die Spaltfragmente von Uran- und Thoriumkernen auseinanderflogen, rund 200 MeV betragen.³⁵ Dies bedeutete, daß ein einziges Kilogramm Uran, wenn es vollständig gespalten wurde, den Energiegehalt von dreißigtausend Tonnen Kohle freisetzte.

Noch 1939 entstanden weltweit über hundert Arbeiten, die sich mit den Voraussetzungen der technischen Nutzung dieses gewaltigen Energiepotentials befaßten; mit ihnen verdichteten sich bereits in den ersten sechs Monaten nach Hahns Entdeckung die Hinweise darauf, daß es tatsächlich möglich war, dieses Potential zu erschließen. Die wichtigste Frage, ob bei den Spaltungsprozessen mehr Neutronen freigesetzt als verbraucht wurden, so daß sich selbsterhaltende Kettenreaktionen auslösen ließen, war bereits wenige Monate nach Hahns Entdeckung grundsätzlich geklärt. Wie mehrere voneinander unabhängige experimentelle Untersuchungen unter anderem von Joliot

35 Diese Zahl wurde später mit rund 160 MeV unwesentlich nach unten korrigiert.

und Fermi zeigten, wurden bei den Spaltungsprozessen mehr Neutronen freigesetzt als verbraucht. Damit war die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, in einer entsprechenden Anordnung Kettenreaktionen erzeugen und einen Kernreaktor bauen zu können.

Im Sommer 1939 veröffentlichte der deutsche Physiker Siegfried Flügge einen Aufsatz zu der Frage: »Kann der Energiegehalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?« (Flügge 1979 [1939]), in dem er bereits allen technischen Hauptproblemen nachging, die für den Bau einer Uranmaschine noch gelöst werden mußten. Flügges Artikel war der erste Beitrag, der sich konkret mit reaktorphysikalischen Fragen und der Neutronenökonomie von Reaktoren auseinandersetzte. Der Berliner Kernphysiker diskutierte dort die für eine Kettenreaktion erforderliche Geometrie und kritische Masse des Spaltmaterials, die Wirkungsquerschnitte von Neutronenströmen, mögliche Substanzen, die zur Moderation und Regulierung dieser Ströme in Frage kamen sowie die Effizienz von Kühlmitteln zur Abführung der bei den Spaltprozessen entstehenden Wärme. Wenngleich sich Flügge in Details noch irrte, waren mit seinem Aufsatz rund ein halbes Jahr nach der Entdeckung der Kernspaltung die Voraussetzungen für den Bau von Uranbrennern bereits weitgehend bekannt.

Hatte der »Plan« der Kernphysik ursprünglich darin bestanden, die Natur der Kernkräfte aufzuklären, so war es jetzt unversehens der Mechanismus der Kernspaltung, um den sich die Diskussion zentrierte. Niels Bohr griff unmittelbar nach dem Erscheinen der kurzen Notiz von Meitner und Frisch in »Nature« deren theoretische Deutung des Spaltungsprozesses auf und entwickelte zusammen mit John A. Wheeler eine abermals modifizierte Version des Tröpfchenmodells, in der »theory and experiment fit together in a reasonable way to give a satisfactory picture of nuclear fission« (Bohr / Wheeler 1939: 462). Die Modifikationen, die Bohr und Wheeler 1939 in das Modell einführten, waren erheblich, da wie Wheeler später feststellte, »not any difficulties in the mathematics« dazu geführt hatten, daß das Phänomen der Kernspaltung nicht theoretisch vorausgesagt worden war, »it was a difficulty in the model« (Wheeler 1979: 266).

Bohr und Wheeler beseitigten die Mängel des ursprünglichen Modells hauptsächlich dadurch, daß sie das Konzept des Compoundkerns um die Annahme einer sogenannten Spaltbarriere erweiterten. Diese Variante des Tröpfchenmodells wurde jetzt »die wegweisende und auf Jahre hin bestimmende Theorie der Kernspaltung« (Wohlfarth 1979: 27), obwohl es sich sehr bald herausstellte, daß viele experimentelle Ergebnisse zu den Spaltungsprozessen im Rahmen dieser Theorie nicht erklärbar waren.

Entscheidend für die Stabilisierung dieser Theorie aber war, das mit ihrer Hilfe das Phänomen der Kernspaltung »gut verstanden werden konnte« (ebd.: 30) und sie sich vor allem bei der technischen Umsetzung und Nutzung dieses Phänomens bewährte.³⁶ Zu ihrer Stabilisierung trug jedoch auch in hohem Maße bei, daß sich im Rahmen des Tröpfchenmodells in erfolgreicher Weise das Phänomen des Brütens vorhersagen ließ. Noch im Jahr 1939 war deutlich geworden, daß sich unter dem Beschuß mit langsamen Neutronen nicht wie zunächst angenommen alle Uranatome, sondern nur das seltene Isotop U-235 spaltete, das nur 0,7 Prozent der natürlichen Uranvorkommen ausmachte, während sich das zu 99,3 Prozent im Natururan enthaltene Uran-238 nicht spalten ließ (Flügge 1939: 129–134).

Die Theorie der Spaltbarriere führte Bohr und Wheeler in ihrem Aufsatz jedoch zu der Schlußfolgerung, daß sich das Uran-238 in das spaltbare Plutonium 239 umwandeln mußte, wenn man es mit schnellen Neutronen bestrahlte. Gleiches galt für das ebenfalls nicht spaltbare Thorium 232, das sich unter dem Beschuß mit thermischen Neutronen in das spaltbare Uran-233 umwandelte. Noch 1940 konnte Alfred Nier in Minnesota diese Prognose von Bohr und Wheeler experimentell bestätigen. Damit rückte es nun in den Bereich des Möglichen, daß man mit der Kernspaltung nicht nur über eine neue Energiequelle von enormer Leistungsdichte, sondern ebenso über eine unvergleichlich ergiebigere Quelle als die fossilen Brennstoffe verfügte, wenn sich die Umwandlung von Uran-238 und Thorium-232 zu spaltbarem Material nicht nur im Labormaßstab, sondern auch in großtechnischen Anlagen betreiben ließ.

Den Beweis, daß dies prinzipiell möglich war, lieferte dann jedoch keine zivile Demonstrationsanlage, sondern der Bau der Atombombe im berühmten »Manhattan Project« der amerikanischen Regierung. Im September 1939, als Bohr und Wheeler ihren berühmten Aufsatz über »The Mechanism of Nuclear Fission« publizierten, stellte das faschistische Deutschland mit seinem Überfall auf Polen die Weichen dafür, daß es noch vor der friedlichen Nutzung der Kernenergie zur Entwicklung nuklearer Waffen kam.

36 Das Tröpfchenmodell des Atomkerns leistet »überall da gute Dienste, wo die freie Beweglichkeit der Nukleonen und der Gegensatz von Oberfläche und Kerninnerem wichtig ist, zum Beispiel bei der Ableitung der Bethe-Weizsäcker-Formel, bei der Erklärung der Kernspaltung und der Kernverdampfungsprozesse sowie bei den als Tröpfchenschwingungen bezeichneten Schwingungen der Kernoberfläche, die für die Kerndeformation und Kernspaltung von Bedeutung sind. Es versagt bei der Beschreibung der inneren Struktur der Kerne« (Bibliographisches Institut [Hrsg.] 1981: 648).

Die Entwicklung dieser Waffen ging auf die Initiative einer Gruppe von Kernphysikern um Enrico Fermi, Otto Robert Frisch, Leo Szilard und Eugen Wigner zurück, die vor dem deutschen und italienischen Faschismus geflohen und in die USA emigriert waren. Doch auch Bohr und Wheeler engagierten sich stark für das »Manhattan Project«. Beide teilten mit ihren deutschen und italienischen Kollegen die Überzeugung, daß Hitler die Möglichkeit, eine Bombe von bislang unvorstellbarer Vernichtungskraft zu entwickeln, sofort nutzen werde, zumal die Kernspaltung ja in Deutschland entdeckt worden war. Diese Gruppe gewann zudem Albert Einstein für ihr Vorhaben, der sein Renommee bei der amerikanischen Regierung dafür einsetzte, Hitler bei der Entwicklung nuklearer Waffen zuvorkommen. In seinem berühmten Brief an Franklin D. Roosevelt räumte Einstein ein, daß es noch ungewiß sei, ob sich eine nukleare Bombe bauen ließe, beschrieb aber deren potentielle Vernichtungskraft und empfahl dem amerikanischen Präsidenten, die Forschung über das Phänomen der Kernspaltung zu intensivieren und große Mengen an Uranerz sicherzustellen (Wohlfarth 1979: 38–39).

Der Kriegseintritt der USA Ende 1941 markierte den Beginn des »Manhattan Project« und mit ihm des ersten Großforschungsprojekts in der Geschichte der modernen Wissenschaft. Bei der Entwicklung der Atombombe beschritt die amerikanische Regierung in diesem Projekt zwei Wege. Der erste Weg, spaltbares Material zu erzeugen, führte über die Anreicherung von U-235. Dazu mußten jedoch erst aufwendige Verfahren entwickelt werden, um dieses Isotop von U-238 zu trennen, von denen nicht sicher war, ob sie in der gebotenen Kürze der Zeit ausreichende Mengen an Spaltstoff liefern würden.³⁷ Die amerikanische Regierung schlug deshalb mit dem Bau des weltweit ersten Kernreaktors einen zweiten Weg zur Erzeugung von bombenfähigem Material ein. Genau ein Jahr nach dem Kriegseintritt der USA gelang Enrico Fermi in Chicago die erste kontrollierte Kettenreaktion mit einem durch Graphit moderierten Reaktor, der den einzigen Zweck besaß, Plutonium zu produzieren. Schließlich führten beide Verfahren zu nuklearen Waffen. Hiroshima wurde durch eine Uranbombe, Nagasaki durch eine Plutoniumbombe vernichtet.³⁸

Auch in Deutschland befaßten sich bereits während des Zweiten Weltkrieges mehrere Forschergruppen, darunter eine Gruppe um Werner Heisen-

37 Die beiden Isotope haben fast identische chemische Eigenschaften und ein ebenfalls nahezu gleiches Atomgewicht. Sie lassen sich deshalb nur sehr schwer trennen.

38 Vgl. zu der Entstehung und dem Verlauf des »Manhattan Project« ausführlich die eindrucksvolle Darstellung der Entwicklung der Atombombe bei Richard Rhodes (1990).

berg am Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin, mit der Entwicklung von Kernreaktoren. Man darf heute davon ausgehen, daß diese Projekte nicht das Ziel besaßen, waffenfähiges Spaltmaterial zu erzeugen (Radkau 1984: 182–183), obwohl große Mengen solchen Materials zur Verfügung gestanden hätten, wenn die deutschen Reaktorentwicklungen erfolgreich gewesen wären. Konflikte zwischen den Forschergruppen haben es jedoch verhindert, daß in Deutschland während des Zweiten Weltkrieges ein Reaktor kritisch wurde.³⁹ Der wichtigste Grund dafür, daß den deutschen Projekten der Erfolg versagt blieb, lag aber letztlich in der Ächtung der Kernphysik als wertlose »jüdische Physik« durch das Naziregime. Die Probleme der deutschen Reaktorprojekte wären mit einiger Sicherheit zu lösen gewesen, wenn die Reichsregierung deren Koordination übernommen, größere Fördermittel in die Kernforschung investiert und die Industrie an der Entwicklung der Reaktoren beteiligt hätte. Sie blieb aber gegenüber der Möglichkeit, nukleare Waffen entwickeln zu können, weitgehend blind, und auch aus der »arischen Physik« der deutschen Hochschulen und Universitäten, die durch die Vertreibung jüdischer Wissenschaftler auf dem Gebiet der Kernforschung weit zurückgeworfen war, kamen keine Initiativen für ein deutsches Kernforschungsprogramm. Insofern »fehlten im NS-Deutschland die für die Entwicklung von Atomwaffen notwendigen politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen« (Radkau 1984: 183).⁴⁰

Obwohl das »Manhattan Project« ausschließlich militärischen Zwecken gedient hatte, so bewies doch der Reaktor von Enrico Fermi für die friedliche Nutzung der Kernenergie nach dem Zweiten Weltkrieg nicht nur, daß es

39 Die deutschen Kernphysiker strebten den Bau von Schwerwasserreaktoren an, da aufgrund eines Meßfehlers Graphit als alternativer Moderator ausgeschieden war. Mit diesem Reaktortyp hätten sich zwar große Mengen von bombenfähigem Plutonium erzeugen lassen, anders als Graphit war aber schweres Wasser äußerst knapp. Keine der Forschergruppen verfügte über einen ausreichenden Vorrat an dieser Substanz, um eine Kettenreaktion zu erzeugen. Dies wäre nur dann möglich gewesen, wenn die ihr jeweilige Kontingent an schwerem Wasser zusammengelegt hätten. Einer solchen Kooperation aber standen bis kurz vor Kriegsende unüberbrückbare Rivalitäten insbesondere zwischen Heisenberg und dem Berliner Physiker Kurt Diebner entgegen, die dazu führten, daß keine der beteiligten Gruppen ihr Ziel verwirklichen konnte. Vgl. dazu ausführlich: Rhodes (1980: 344–346; Radkau 1983: 35–37).

40 Nicht einmal der Luftangriff auf eine norwegische Fabrik, die schweres Wasser produzierte, aber von den Alliierten zerstört wurde, bevor die deutsche Reichsregierung ausreichende Mengen dieser Substanz beschlagnahmen konnte, öffnete den Nazis die Augen (vgl. Rhodes 1990: 526). Hitler konzentrierte die Mittel für die Kriegsforschung vor allem auf die Entwicklung seiner »Wunderwaffen« V-1 und V-2, so daß für den Bau einer Atombombe kaum mehr Ressourcen zur Verfügung standen.

prinzipiell möglich war, Kernkraftwerke zu bauen, sondern auch, das zu über 99 Prozent im Natururan vorkommende Isotop U-238 im großtechnischen Maßstab in Plutonium umzuwandeln und auf diese Weise neues Spaltmaterial zu »brüten«. Diese Möglichkeit eröffnete völlig neue Dimensionen der Energiegewinnung, da mit ihr nicht nur eine Energiequelle von ungeheurer Leistungsdichte, sondern auch ein schier unerschöpflicher Vorrat an spaltbarem Material zur Verfügung stand.

Wenn sich die Option, die Kernspaltung technisch zu nutzen, darauf beschränkt hätte, U-235 anreichern zu müssen und damit nicht einmal ein Prozent des Natururans spalten zu können, wäre der damals bekannte Vorrat an natürlichen Kernbrennstoffen rasch erschöpft gewesen. Die Rolle der Kernenergie hätte sich damit auf eine weitere Energiequelle neben den fossilen Brennstoffen reduziert, die nach etwa fünfzig Jahren zur Neige ging. Durch die Entwicklung von Brutkraftwerken allerdings ließ sich der nukleare Brennstoffvorrat um das Sechzig- bis Siebzigfache strecken und der allen Prognosen nach weltweit rasch anwachsende Energiebedarf auf mehrere Jahrhunderte hinaus decken.⁴¹ Zugleich ging die Physik der Kernspaltung nach den stürmischen Entwicklungen in den dreißiger und vierziger Jahren bereits um 1950 in eine Normalwissenschaft über, in der keine grundlegenden Innovationen mehr stattfanden. Soweit es die Physik der Kernspaltung betraf, verband sich mit dem Ende des Manhattan-Projekts auch die Schließung der kernphysikalischen Theoriebildung. Bohrs Tröpfchenmodell des Atomkerns blieb die bis heute vorherrschende Standardtheorie der Kernspaltung, wengleich es bei der Erklärung einer Vielzahl von empirischen Befunden versagt und zwischenzeitlich auch andere Modelle zur Beschreibung dieses Phänomens herangezogen wurden.

So erlebte das Schalenmodell des Kerns infolge der experimentellen Befunde, die Maria Goeppert-Mayer in ihrem Aufsatz »On Closed Shells in Nuclei« (1948) Ende der vierziger Jahre veröffentlichte, im Verlauf der fünfziger Jahre einen neuen Aufschwung, und »es wurde später versucht, die inzwischen große Vielfalt an experimentellen Ergebnissen durch die Kombination des Tröpfchenmodells und des Schalenmodells theoretisch zu beschreiben« (Wohlfarth 1979: 34). Daneben entstand eine Reihe weiterer anschaulicher Modelle des Atomkerns wie das Sandsackmodell, das Alphateilchenmodell oder das Clustermodell, die auch zum Teil wiederum mit quantentheoretischen Beschreibungen des Atomkerns verbunden wurden.

41 Zum Potential der Kernenergie, das sich durch die Bruttechnologie im Vergleich zu fossilen Brennstoffen zumindest prinzipiell gewinnen läßt, vgl. Gerwin (1976).

Doch all diese Modelle sind jeweils spezifischen experimentellen Fragestellungen angepaßt und bewähren sich nur »vis-à-vis« spezieller Beobachtungen und Daten. Es gibt »bis heute keine Theorie der Kernspaltung, die einheitlich die experimentellen Befunde erklären kann« (ebd.: 35), und die Forschung

hat heute noch die gleiche Fragestellung wie 1939: Welche Kerne werden bei der Spaltung gebildet, welche Energien haben die Spaltprodukte, wie zerfallen sie, wie viele Neutronen werden freigesetzt usw. (ebd.: 47–48)

Einen ihrer Schwerpunkte bilden nach wie vor die Transurane und die Möglichkeiten und Grenzen der Synthese von künstlichen Elementen.

Auch die Natur der Kernkräfte kann bis heute nicht befriedigend erklärt werden. Die neuen und ständig weiterentwickelten Beschleunigungstechniken der Hochenergie und Partikelphysik, die seit dem Ende der vierziger Jahre zur Verfügung standen, hatten zur Folge, daß »the next half century was characterized by starting experimental and theoretical discoveries and an assortment of puzzles wherever one looked« (Brown / Hoddeson 1983: 5).⁴² Insbesondere Werner Heisenberg zeigte sich über diese Entwicklung zutiefst beunruhigt.

Neben den genannten drei Elementarteilchen: Proton, Elektron und Neutron hat man schon in den dreißiger Jahren noch weitere entdeckt, und in den allerletzten Jahren ist die Anzahl dieser neuen Teilchen erschreckend angewachsen. ... Im ersten Augenblick sieht es so aus, als sei man nun wieder gezwungen, eine große Anzahl qualitativ verschiedener Elementarteilchen anzunehmen, und das wäre im Hinblick auf die Grundvoraussetzungen der Atomphysik sehr unbefriedigend. (Heisenberg 1965: 32)

Er stand der experimentellen Partikelphysik daher auch grundlegend skeptisch gegenüber und bezweifelte, daß man dem Begriff der »kleinsten Teilchen ... überhaupt einen Sinn beilegen kann« (Heisenberg 1981 [1973]: 879). Heisenberg war davon überzeugt, daß die Quantenmechanik auf der subatomaren Ebene ebenso scheitern würde wie zuvor die klassische Physik auf der atomaren Ebene und Begriffe wie Raum und Zeit dort nicht mehr angemessen waren.

»In der Welt der Elementarteilchen«, so Heisenberg, wird »der Sinn solcher Wörter wie ›Teilen‹ und ›räumliche Ausdehnung‹ problematisch«. Sie

42 Mit den neuen Maschinen entstand auch eine derart große Fülle neuer subatomarer Teilchen, daß die Partikelphysiker ihr Forschungsgebiet zeitweise abschätzig als »Teilchenzoo« bezeichneten (Interview XXII).

verlieren ihre Bedeutung »so weitgehend, daß man erkennt, daß diese Gebilde keine Dinge im ursprünglichen Sinne des Wortes mehr sind« (ebd.: 879). Statt sich auf die Suche nach immer neuen Elementarteilchen zu begeben, plädierte er für eine stärker theoretische Ausrichtung der Atomphysik an »fundamentalen Symmetrieoperationen« und einem »einheitlichen Formprinzip« (ebd.: 879).

Der kernphysikalische *Mainstream* folgte seiner Auffassung freilich nicht, sondern machte sich im wesentlichen die »substantialistische« und forschungspragmatische Sichtweise Yukawas und seiner Schule zueigen, wengleich Yukawa 1966 einräumte, daß die Problemstellung: »What are the basic constituents of matter?« den selben epistemischen Status besaß wie die Frage: »Is a fish happy swimming in the water? ... Neither question is answerable on entirely rational grounds« (Yukawa 1966, zitiert nach Brown / Hoddeson 1983: 25). Aber genausowenig wie es Yukawa zufolge einen Grund dafür gab, »to doubt that the fish is happy«, bestand für ihn ein Anlaß,

to doubt that matter is composed of quarks, leptons, and other subatomic particles. The accepting, though nonrational, stance usually is more fruitful than the sceptical one, because it leads the researcher to new confrontation with nature. (ebd.: 25)⁴³

In den Augen der Experimentatoren erwies sich der Weg, den die Partikelphysik einschlug, als der richtige Weg. »Proposing new particles turned out to be the correct approach to solving the problems at hand« (ebd.: 24).⁴⁴

43 Erwin Schrödinger wurde über die Entwicklungen in der Nuklearphysik zu einem frühen anti-positivistischen Erkenntnistheoretiker, der bei allem epistemischen Optimismus, den er vertrat, der Ansicht war: »Die Welt ist ein Konstrukt aus unseren Empfindungen, Wahrnehmungen und Erfahrungen.« Vgl. zu den erkenntnistheoretischen Reflexionen Schrödingers Interpretation ausführlich: Elkana (1992, Zitatstelle: 130).

44 Knorr-Cetina beschreibt ganz im Einklang mit dieser pragmatisch an den »material procedures« orientierten Perspektive die Gemeinschaft der Partikelphysiker in der biologischen Metapher eines »Superorganismus«, der sich um die Beschleuniger und Detektoren als die Maschinen zentriert, die es erst ermöglichen, daß sich die Forschung auf diesem hoch ungewissen Feld kooperativ auf gemeinsame Fragen ausrichten kann (Knorr-Cetina 1985b). Im organisationssoziologischen Schema von Whitley entspricht dies dem Quadranten (3) einer »organischen Profession«, bei der sich eine große Ungewißheit der Forschungsziele mit einer hohen Interdependenz der Forschungsaufgaben paart.

Kapitel 3

Wege zur kernphysikalischen Großforschung

3.1 Kognitive Struktur der kerntechnischen Forschung und die Formierung des atompolitischen Netzwerks in der Bundesrepublik

Sowenig wie von der Partikelphysik Irritationen für die Physik der Kernspaltung ausgingen, sowenig warf auch die Reaktorphysik neue theoretische Probleme auf diesem Gebiet auf. Seit dem »Manhattan Project« war der Reaktor stabil reproduzierbar und alle relevanten empirischen Phänomene, die sich mit der Konstruktion solcher Maschinen verbanden, ließen sich im Rahmen des Tröpfchenmodells in befriedigender Weise erklären. Die offenen Fragen, die sich der Reaktorphysik nach dem Zweiten Weltkrieg stellten, bezogen sich dementsprechend nicht mehr auf die Grundprinzipien der Spaltungsprozesse, sondern auf die Auswirkungen unterschiedlicher Materialien und Werkstoffe sowie deren geometrischer Anordnung auf das Verhalten der Neutronenflüsse und Atome innerhalb von Reaktorkernen, und damit auf die Ökonomie, Effizienz und Sicherheit der entsprechenden Anlagen.

Diese technischen Fragen liefen auf eine klar umrissene, anwendungsorientierte und kumulative Grundlagenforschung hinaus, die von theoretischen Vermutungen über die reaktorphysikalischen Eigenschaften und Effekte bestimmter Werkstoffe und Materialanordnungen ausging und diese Vermutungen durch die Messung der Wirkungsquerschnitte von Neutronenflüssen experimentell überprüfte. Ihre Klärung machte es damit zugleich erforderlich, komplementäres Wissen aus der Materialforschung und dem Maschinenbau mit neutronenphysikalischen Methoden und Befunden zu kombinieren, und führte zu einer entsprechend engen Koppelung und Kooperation zwischen diesen Gebieten. Ende der sechziger Jahre war die Reaktorphysik dann weitgehend erforscht und ging von einem grundlagenorientierten Feld in ein Ingenieurfach über.

Auch die technischen Möglichkeiten, die sich mit der Kernspaltung verbanden, reduzierten sich auf nur wenige und instruktive Ziele, nachdem sich die anfängliche Welle der Euphorie über die Entdeckung dieser neuen Energiequelle gelegt hatte und die Spekulationen über ihr Anwendungspotential realistischen Einschätzungen wichen. Zudem standen diese Anwendungsmöglichkeiten in einer transitiven Ordnung und ließen ein klares technisches Leitbild vom optimalen Reaktor zu.

In dem Maße wie die Angst vor der Atombombe, die durch die Vernichtung von Hiroshima und Nagasaki ausgelöst worden war, gegen Ende der vierziger, Anfang der fünfziger Jahre allmählich in eine positive Bewertung der Kernenergie umschlug, begannen sich die Spekulationen über deren Anwendungsmöglichkeiten förmlich zu überbieten. Angefangen bei atomgetriebenen Lokomotiven und Automobilen, über Flugzeuge, die einen eigenen Reaktor mit sich führten, bis hin zur Stromerzeugung in privaten Haushalten gab es vermeintlich kaum einen technischen Bereich, der durch die Kernkraft nicht revolutioniert werden würde. Der Automobilhersteller Ford stellte 1949 auf einer Messe bereits das Modell eines atomgetriebenen Personenwagens vor, wenngleich er vorerst darauf verzichtete, es mit einem entsprechenden Antriebsaggregat auszustatten (Del Sesto 1986: 62).

Tatsächlich waren diese Spekulationen über die künftigen Anwendungsmöglichkeiten der Kernkraft nicht völlig unbegründet. Die unvergleichlich hohe Leistungsdichte des nuklearen Spaltmaterials gegenüber fossilen Brennstoffen schien es zeitweise zu ermöglichen, gewissermaßen miniaturisierte Reaktoren zu entwickeln, deren Brennstoffvorrat sich auf das Format von Pillen beschränkte, die über Jahre und Jahrzehnte auf kleinstem Raum und ohne nennenswertes Gewicht große Mengen an Energie lieferten. So begeistert wie sich die Medien und populärwissenschaftliche Darstellungen in den ersten Nachkriegsjahren immer neue kerntechnische Anwendungsmöglichkeiten ausmalten, so rasch ging jedoch die fachliche Diskussion über diese Spekulationen hinweg. In dieser Diskussion wurde schon frühzeitig deutlich, daß der Vorteil der hohen Leistungsdichte von Kernbrennstoffen durch den Nachteil zunichte gemacht wurde, die Reaktoren mit großem Materialaufwand von der Außenwelt abschotten zu müssen. Was sich durch die hohe Leistungsdichte des Spaltmaterials an Raum und Gewicht einsparen ließ, wurde durch diese Notwendigkeit wieder kompensiert (Radkau 1984: 194–195).

Damit reduzierten sich die technischen Möglichkeiten zur Nutzung der Kernenergie, soweit es mobile Reaktoren betraf, auf Antriebsaggregate für Wasserfahrzeuge, bei denen die Größe und das Gewicht der Anlagen keine bedeutende Rolle spielten. Doch auch hier wurde sehr bald deutlich, daß die

Kosten für Bau und Betrieb solcher Antriebsaggregate ihren Nutzen bei weitem überstiegen und sich Schiffsreaktoren nur im militärischen Bereich sinnvoll einsetzen ließen, aber wirtschaftlich keine Zukunft besaßen.⁴⁵ Die zivilen Optionen zur Nutzung der Kernenergie engten sich hierdurch im wesentlichen auf die Entwicklung von stationären Reaktoren ein, die sich wiederum in eine erste Generation von vergleichsweise einfach aufgebauten reinen Leistungsreaktoren und physikalisch-technisch sehr viel komplexeren Brutreaktoren als der zweiten Generation von nuklearen Kraftwerken aufteilten. Während die erste Generation von Reaktoren den Einstieg in die Kernenergie ermöglichte, sollten die Brutkraftwerke der zweiten Generation die bestmögliche und langfristige Nutzung des Kernenergiepotentials sicherstellen.

Allerdings tat sich im Fall der reinen Leistungsreaktoren zunächst eine verwirrende Vielzahl von möglichen Reaktortypen auf, die es schwer machte, deren Vor- und Nachteile zu bestimmen, und die ihre Selektion mit hoher Ungewißheit belastete. Wollte man aber bei den uranverbrauchenden Reaktoren nicht stehen bleiben und das Potential der Kernspaltung durch Kraftwerke, die sowohl Elektrizität als auch neues Brennmateriale erzeugen konnten, möglichst effizient nutzen, so gab es mit dem schnellen Plutonium- und dem thermischen Thoriumbrüter genau zwei optimale Reaktortypen, die in dieser Hinsicht allen anderen Lösungen überlegen waren (zum prospektiven Nutzen der Bruttechnik vgl. Gerwin 1976).

In allen Ländern, die nach dem Zweiten Weltkrieg den Weg in die friedliche Nutzung der Kernenergie einschlugen, galt der Bau von reinen Leistungsreaktoren nur als der erste Schritt auf diesem Weg und die Entwicklung von Brutkraftwerken, die das Potential der Kernenergie erst vollständig ausnutzten, wie selbstverständlich als das eigentliche, wenngleich noch entfernte atompolitische Ziel. So konstatiert Alvin Weinberg rückblickend:

45 Eines der wenigen atomgetriebenen Wasserfahrzeuge, das rein zivilen Zwecken diente, war die »Otto Hahn«, die am GKSS-Forschungszentrum Geesthacht entstand und 1968 in Betrieb ging. Auch das Forschungszentrum Geesthacht wurde im Zuge der Institutionalisierung der Forschungspolitik des Bundes von einer Einrichtung der Länder in eine Organisation umgewandelt, die den Statuten der Großforschung unterliegt. Der Bau der »Otto Hahn« beschränkte sich jedoch auf die rein technische Entwicklungsaufgabe, den amerikanischen Leichtwasserreaktor als Antriebsaggregat auf ein Überwasserfahrzeug zu übertragen. Das Transportschiff erwies sich zudem als unrentabel, was dazu führte, daß die technische Linie ziviler atomgetriebener Wasserfahrzeuge sehr rasch wieder aufgegeben wurde. Da Geesthacht vor diesem Hintergrund anders als die KfK und KfA nicht als Vorbild für das organisatorische Modell der Großforschung fungierte, wird die Entwicklung dieser Einrichtung für die Zwecke der vorliegenden Arbeit im folgenden ausgeklammert. Vgl. zu Entstehung und Entwicklung der GKSS ausführlich Renneberg (1995).

Es mag vielleicht heute erstaunen, aber gerade der Einsatz von Brutreaktoren – und ich meine dabei die sogenannten Schnellen Brüter – war in jenen Tagen eines der Hauptziele. (Weinberg, zitiert nach Gerwin 1976: 135)

Es war denn auch weniger ein Phänomen der Kernspaltung selbst, das nach dem Zweiten Weltkrieg die Vorstellung begründet hat, an der Schwelle zu einer neuen Ära zu stehen, als vielmehr der schier unerschöpfliche Energievorrat, der sich mit der Option des Brütens von nuklearem Spaltmaterial auftrat und durch die sich letztlich die energiewirtschaftlichen Probleme der Menschheit auf Jahrhunderte hinaus lösen lassen sollten. Vor diesem Hintergrund war man auch dazu bereit, es in Kauf zu nehmen, daß Brutkraftwerke im Vergleich zu anderen Reaktortypen die höchsten Entwicklungskosten verursachten und sich die Investitionen in solche Reaktoren erst über einen sehr langfristigen Zeitraum amortisierten. Da diese Reaktoren jedoch große Mengen an spaltbarem Material produzierten, mußten sich ihre Baukosten durch ständig sinkende Brennstoffpreise dann letztlich mehr als ausgleichen lassen (Kernforschungszentrum Karlsruhe 1965; Häfele 1984).

Nichtsdestoweniger blieb es jedoch bis in die frühen fünfziger Jahre zunächst einmal bei der rein militärischen Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Kernenergie. Die ersten Reaktoren in England und Frankreich entstanden, wie bereits der Reaktor von Fermi, mit dem Ziel, möglichst rasch Plutonium für die atomare Aufrüstung zu gewinnen und dienten nicht der Stromerzeugung. Auch in den USA besaß die friedliche Nutzung der Kernenergie zunächst keine Priorität. Die von der amerikanischen Regierung 1946 gegründete Atomic Energy Commission (AEC) verfolgte in den Nachkriegsjahren hauptsächlich militärische Ziele und trieb, bevor sie sich der Entwicklung von zivilen Kernkraftwerken zuwandte, den Bau von nuklearen Antriebsaggregaten für Unterseeboote voran. Das erste atomgetriebene Unterseeboot »Nautilus« wurde 1954 von der amerikanischen Marine in Dienst gestellt. Dem folgten dann mit Zerstörern und Flugzeugträgern wie der »Enterprise« Ende der fünfziger Jahre auch atomgetriebene Überwasserschiffe (Müller 1990: 400–401).⁴⁶

Die amerikanische Regierung sah auf dem Gebiet der zivilen Kerntechnik in den ersten Nachkriegsjahren keinen dringenden Handlungsbedarf, da sie davon ausging, durch das »Manhattan Project« gegenüber allen Ländern

46 Der Grund für den Vorrang, den die atomaren Antriebe für die U-Boote besaßen, lag darin, daß deren Tauchfähigkeit durch den Bedarf an Sauerstoff für die Dieselmotoren beschränkt wurde. Da nukleare Spaltprozesse keinen Sauerstoff verbrauchen, ermöglichen sie Unterwasserfahrten von praktisch unbegrenzter Reichweite.

auf Jahrzehnte hinaus einen uneinholbaren Vorsprung in dieser Technik zu besitzen (Cowan 1990: 562). Diese Einschätzung änderte sich dann jedoch schlagartig, als die UdSSR 1949 ihre erste Atombombe zündete und zugleich ein umfangreiches Programm zur Förderung der zivilen Kerntechnik ankündigte. Der einsetzende Kalte Krieg und der unerwartet geringe Vorsprung der USA vor der Sowjetunion ließen in der amerikanischen Regierung jetzt die Befürchtung aufkommen, »that power-hungry (that is, energy scarce) nations will gravitate towards the USSR if it wins the nuclear power race« (Hertsgaard, zitiert nach Cowan 1990: 25). Diese Befürchtung bildete das Hauptmotiv für das »Atoms-for-Peace-Programm« des amerikanischen Präsidenten Dwight D. Eisenhower aus dem Jahr 1953, mit dem die Förderung der zivilen Kerntechnik in den Vereinigten Staaten erstmals Priorität vor ihrer militärischen Nutzung erlangte und sich die USA dazu bereit erklärten, ihre Kerntechnologie anderen Ländern zu friedlichen Zwecken zur Verfügung zu stellen, wenn sie sich einer entsprechenden Kontrolle unterwarfen.

Mit dem »Atoms-for-Peace-Programm« der amerikanischen Regierung bestand nun kaum mehr ein Zweifel daran, daß sich auch die Bundesrepublik am einsetzenden internationalen Wettbewerb auf dem Gebiet der zivilen Nukleartechnik beteiligen durfte. Hatte es kurz nach dem Zweiten Weltkrieg so ausgesehen, als werde in Deutschland nie wieder kerntechnische Forschung betrieben werden können, geschweige denn je ein Reaktor entstehen, so verhielten sich die Alliierten, was das Forschungsverbot auf diesem Feld angeht, bereits am Beginn der fünfziger Jahre relativ konziliant und unternahmen kaum ernsthafte Anstrengungen, um die auf deutscher Seite bereits frühzeitig einsetzenden Versuche zu unterbinden, institutionelle Strukturen für die spätere öffentliche Förderung der Kerntechnik zu schaffen. So konnten die führenden Repräsentanten der deutschen Kernphysik und die Bundesregierung bereits lange Zeit vor der Aufhebung des alliierten Forschungsverbots zielstrebig aufeinander zugehen, um der künftigen Atompolitik des Bundes einen organisatorischen Rahmen zu geben. Schon 1949 gründete die Max-Planck-Gesellschaft mit Werner Heisenberg als Präsidenten den Deutschen Forschungsrat (DFR), der als Planungs- und Beratungsgremium der Bundesregierung in Fragen der Kernforschung fungieren und beim Bundeskanzleramt angesiedelt sein sollte. In der Absicht, den DFR unmittelbar als Beratungsorgan des Bundeskanzlers zu institutionalisieren, kam zugleich auch die große Bedeutung zum Ausdruck, die der Bund der Kernforschung und der künftigen Rolle der Kernenergie beimaß (Hohn/Schimank 1990: 103).

Die Politik der Bonner Regierung richtete sich von Anbeginn auf das Ziel aus, den Rückstand, in den die Kernforschung in der Bundesrepublik gegen-

über den USA, der UdSSR sowie Großbritannien und Frankreich geraten war, möglichst rasch aufzuholen. Zwar war bis zu diesem Zeitpunkt weder in diesen Ländern noch sonstwo auf der Welt auch nur ein einziges ziviles Kernkraftwerk entstanden, aber die militärische Forschung, die dort betrieben wurde, lieferte in großem Umfang »spin-offs« für die Entwicklung ziviler Reaktoren. In ihrem Ziel, den deutschen Nachholbedarf in der Kerntechnik rasch auszugleichen, konnte sich die Bundesregierung zudem auf einen breiten und bis in die frühen siebziger Jahre ungebrochenen energiepolitischen Konsens stützen. Kaum ein gesellschaftliches Projekt hat in Deutschland je wieder eine so große und über alle Parteien und politischen Gruppierungen hinweg ungeteilte Zustimmung gefunden, wie der Einstieg in die Kernenergie. Einem rohstoffarmen und wirtschaftlich stark vom Außenhandel abhängigen Land wie der Bundesrepublik bot die Kernenergie gleich die doppelte Chance, sich von der Einfuhr fossiler Energieträger unabhängig zu machen und seine Nukleartechnologie zu exportieren. Diese Chance einte damals alle gesellschaftlichen Gruppen und gab der Kerntechnik in der Energie- und Forschungspolitik der Bundesrepublik höchste Priorität (Radkau 1984: 189).

Die Gründung des DFR und die Absicht der Bundesregierung, ihn als zentrales Beratungsorgan zu institutionalisieren, markierte zugleich den jetzt auch in Deutschland beginnenden Aufstieg der Kernphysiker aus dem Status einer bislang eher unbedeutenden und von der Öffentlichkeit wenig beachteten wissenschaftlichen Gemeinschaft in den Stand einer forschungspolitischen Führungselite, der die Aufgabe zufiel, die Ziele der bundesdeutschen Atompolitik zu definieren und ihre Maßnahmen zu koordinieren. Im Zuge dieses Aufstiegs avancierte das Max-Planck-Institut für Physik von Werner Heisenberg gewissermaßen zum Mutter-Institut der bundesdeutschen Kernphysik und zum atompolitischen »Kommunikationszentrum, in dem viele Fäden zusammenliefen« (Radkau 1983: 37). Aus diesem Institut rekrutierten sich nicht nur die Inhaber der ersten kern- und reaktorphysikalischen Lehrstühle an den Hochschulen. Aus ihm ging mit Figuren wie Karl Wirtz, Wolf Häfele, Rudolf Schulten auf der wissenschaftlichen und Wolfgang Finkelburg oder Karl Winnacker auf der industriellen Seite auch die spätere Führungselite des deutschen Reaktorbaus hervor (ebd.: 37–38). Alles in allem konstituierte sich die Grundstruktur des atompolitischen Netzwerks in der Bundesrepublik damit bereits in der ersten Hälfte der fünfziger Jahre (vgl. dazu auch Müller 1990: insbes. 1–12).

Wenn das institutionelle Arrangement zwischen der Bundesregierung und dem DFR trotzdem vorerst keinen Bestand hatte, so war dies weder auf eine

Intervention der Alliierten, noch auf einen mangelnden gesellschaftlichen Konsens über die atompolitischen Ziele der Bundesregierung, sondern auf den forschungspolitischen Kompetenzkonflikt zurückzuführen, den der Bund und die Länder in den fünfziger und sechziger Jahren austrugen und der sich zunächst auch auf die Kernforschung erstreckte. Nur wenige Wochen nach der Gründung des Deutschen Forschungsrats und noch vor der Verabschiedung des Grundgesetzes hatten die Länder 1949 mit dem »Königsteiner Staatsvertrag« die Forschungsförderung mit Ausnahme der Ressortforschung zu ihrer alleinigen und gemeinschaftlichen Aufgabe erklärt und damit einen forschungspolitischen Kompetenzstreit mit der Bundesregierung ausgelöst, der erst fünfzehn Jahre später, dann allerdings in sehr stabiler Weise durch das »Verwaltungsabkommen über die Förderung von Wissenschaft und Forschung« zwischen Bund und Ländern von 1964 beigelegt wurde (vgl. dazu und im Folgenden: Hohn/Schimank 1990: 344–386).

Während dieser Zeit blieben der Bonner Regierung die Hände in der Forschungspolitik weitgehend gebunden. Dies galt anfänglich auch für die Förderung der Kernforschung, für die bis 1956 allein die Bundesländer zuständig waren. So wurden die ersten deutschen Forschungsreaktoren durch die Länder beschafft und finanziert, während die Bundesregierung allenfalls Zuschüsse zu diesen Projekten leisten durfte. Auch die späteren kerntechnischen Großforschungseinrichtungen des Bundes, das Kernforschungszentrum Karlsruhe und die Kernforschungsanlage Jülich entstanden zunächst als Einrichtungen der Länder Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen und gingen erst später auf den Bund als dem größten Anteilseigner über.

Der forschungspolitische Kompetenzkonflikt zwischen Bund und Ländern hatte am Anfang der fünfziger Jahre auch zur Folge, daß das gemeinsame Projekt von Bundeskanzleramt und DFR scheiterte und sich der DFR nicht als Planungs- und Beratungsgremium der Bundesregierung etablieren konnte. Da der Königsteiner Staatsvertrag die Forschungspolitik des Bundes zuallererst zu einem verfassungspolitischen Problem machte, mußte das Bundeskanzleramt die federführende Rolle auf diesem Feld an das Bundesministerium des Inneren (BMI) abtreten. Das BMI aber kooperierte wiederum eng mit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) als einer damals noch ausschließlich von den Ländern finanzierten Einrichtung, über die es versuchte, die forschungspolitischen Interessen des Bundes mit den Interessen der Länder auf möglichst kooperativem Weg miteinander abzustimmen. Dies führte dazu, daß nun die DFG die zuvor dem DFR zugeordnete Funktion als Planungs- und Beratungsgremium der Bundesregierung übernahm und der DFR in deren »Senatskommission für Atomphysik« aufging. Zugleich

kam der DFG damit auch die Aufgabe zu, mit außerordentlichen Zuwendungen und Sonderhaushalten des Bundes die kernphysikalische Forschung in der Bundesrepublik zu fördern (vgl. dazu ausführlich Hohn/Schimank 1990).

Diese institutionelle Lösung hatte jedoch nur bis Mitte der fünfziger Jahre und damit so lange Bestand, wie das alliierte Verbot der kerntechnischen Forschung in der Bundesrepublik grundsätzlich in Kraft war und damit noch kein dringender atompoltischer Handlungsbedarf bestand. Mit Blick auf die bevorstehende Aufhebung des kerntechnischen Forschungsverbots wurde sie aber auch bereits in dieser Zeit nicht nur in der Bonner Regierung als eine unbefriedigende Zwischenlösung empfunden. Auch in den Augen der führenden Vertreter der Kernphysik und der Wirtschaft war die DFG der falsche Ort für die Förderung der Kernforschung. Diese Einrichtung verstand sich als eine Organisation zur Förderung der autonomen Grundlagenforschung, die ihre Mittel nach innerwissenschaftlichen Kriterien und auf der Basis von »peer-reviews« vergab. Der Bau von Kernreaktoren jedoch lief auf eine ziel- und anwendungsorientierte Grundlagenforschung in Verbindung mit einem hohen Anteil an technischen Entwicklungen hinaus, die es durch projekt- und zweckgebundene Mittel zu fördern galt.

Zudem wachten die Länder streng darüber, daß die außerordentlichen Zuwendungen des Bundes an die DFG in einem finanziellen Rahmen blieben, der den Königsteiner Staatsvertrag und ihre forschungs- und verfassungspolitische Position nicht gefährdete. Dies legte der Förderung der kerntechnischen Forschung durch den Bund neben dem alliierten Verbot zusätzliche institutionelle Fesseln an und rief heftige Kritik aus den Reihen der Wissenschaft und Wirtschaft hervor. Vor allem Heisenberg

drängte die Bundesregierung schon vor 1955 immer wieder zum Handeln und ging dabei bis zu einer scharfen öffentlichen Kritik an der Regierung Adenauer, die nach Heisenbergs damaliger Auffassung dem Ausland einen kaum mehr aufzuholenden Vorsprung ließ. (Radkau 1984: 191)

Die Unterzeichnung der Pariser Verträge und die von der UNO 1955 ausgerichtete 1. Genfer Atomkonferenz, an der die Bundesrepublik als gleichberechtigter Partner teilnehmen durfte, veränderten dann aber in der Mitte der fünfziger Jahre die forschungspolitische Situation im Bereich der Kerntechnik fast schlagartig und grundlegend. Die Genfer Atomkonferenz stärkte den in der Bundesrepublik ohnehin bestehenden gesellschaftlichen Konsens in der Frage der friedlichen Nutzung der Kernenergie nochmals. Ihre an die Vertreter der Bundesregierung gerichtete Botschaft, »die Nationen der Welt treten jetzt in einen friedlichen Wettbewerb in der Kerntechnik ein und Ihr

dürft mitmachen« (Interview XIV), hinterließ hier einen geradezu überwältigenden Eindruck und löste einen heute kaum mehr vorstellbaren atompolitischen Enthusiasmus aus. Zugleich machte die Genfer Konferenz, auf der die Atomkräfte ihre kerntechnischen Forschungsaktivitäten erstmals weitgehend offenlegten und eine Fülle neuer Ergebnisse präsentierten, aber auch deutlich, wie weit die Bundesrepublik auf diesem Gebiet mittlerweile zurücklag.

In dieser Situation nutzte der Bund gewissermaßen die Gunst der Stunde, schuf noch im Herbst 1955 ein eigenständiges Bundesministerium für Atomenergie (BMA) und berief nur drei Monate später nach dem Vorbild der amerikanischen Atomic Energy Commission (ACE) die Deutsche Atomkommission (DAK) ein.⁴⁷ Im Unterschied zur ACE war die Deutsche Atomkommission jedoch keine staatliche Behörde mit hoheitlichen Befugnissen, sondern ein ehrenamtliches Gremium, das sich aus den führenden Repräsentanten der Kernphysik und Vertretern der Industrie zusammensetzte.

Nur wenige Zeit nach der Gründung des BMA und der Einberufung der Atomkommission lenkten dann auch die Länder in ihrem forschungspolitischen Kompetenzkonflikt mit dem Bund ein, indem sie 1956 im speziellen Fall der Kernforschung ein übergreifendes »gesamtstaatliches Interesse« an der Förderung dieses Gebiets akzeptierten und es vom Königsteiner Staatsvertrag ausnahmen. Diese Entscheidung war nicht zuletzt auch haushaltspolitisch motiviert, da sich bereits abzeichnete, daß die Förderung der Kerntechnik die finanziellen Möglichkeiten der Länder auf Dauer bei weitem überstieg. Um aber den Präzedenzfall zu vermeiden, daß der Bund projekt- und zweckgebundene Gelder an die DFG vergab und sich damit möglicherweise auch auf anderen Gebieten Einfluß auf ihren Kompetenzbereich verschuf, untersagten die Länder der Forschungsgemeinschaft, Gelder aus dem Haushalt des BMA anzunehmen. Durch diesen Beschluß schied die DFG jetzt praktisch aus der Förderung der Kernforschung aus, während sich zugleich die Verhandlungen in dieser Frage auf die Ebene von bilateralen Abkommen zwischen dem BMA und den jeweils einzelnen Ländern verlagerte. Damit war nun der Weg für die Förderung der Kerntechnik durch den Bund frei, obwohl es hierfür keine rechtliche Grundlage gab (Hohn/Schimank 1990: 355–356).

47 Als Großbritannien dann noch im selben Jahr das weltweit ehrgeizigste Kernkraftprogramm ankündigte, stärkte das die Zuversicht, daß auch die Bundesrepublik im internationalen Wettbewerb um eine Spitzenposition auf diesem Gebiet mithalten konnte (Müller 1990: 389–390).

3.2 Koordinationsprobleme der deutschen Atompolitik und das »lock-in« des Leichtwasserreaktors als suboptimale Lösung

Ungeachtet der fehlenden rechtlichen Grundlagen nahm die Deutsche Atomkommission ihre Arbeit im Jahr 1956 auf und verabschiedete im Dezember 1957 ihr »Memorandum zu technischen, wirtschaftlichen und finanziellen Fragen des Atomprogramms«, das auch unter der Bezeichnung »Eltviller-Programm« bekannt wurde. Das »Eltviller-Programm« sah vor, mit Leistungsreaktoren einer ersten Generation bis 1965 in der nuklearen Energieproduktion Fuß zu fassen, um dann mit den Vorbereitungen für die Entwicklung von Brutkraftwerken der zweiten Generation zu beginnen. Es empfahl aber auch bereits jetzt schon eine Natururan-Strategie und sprach sich für die Entwicklung von Reaktoren aus, die möglichst große Mengen an Plutonium erzeugten und den Einstieg in eine sich selbst tragende nationale Energieerzeugung ermöglichten (Müller 1990: 366–368).

Sosehr innerhalb und außerhalb der Kommission Einvernehmen über die grundsätzlichen Ziele der deutschen Atompolitik bestand, sowenig war sie jedoch in der Lage, klare Entscheidungskriterien für die Auswahl der Leistungsreaktoren vorzugeben, da sich in dieser Hinsicht mittlerweile keine wissenschaftlich eindeutigen Urteile und allgemein konsensfähigen Empfehlungen mehr formulieren ließen. Reduzierten sich die Auswahlmöglichkeiten bei den Moderatoren und Kühlmitteln ursprünglich im wesentlichen auf Graphit, schweres Wasser und eine Reihe von Gasen, so war das wissenschaftliche Wissen um alternative Reaktorkomponenten und deren Kombinationsmöglichkeiten seit dem Kriegsende ständig gestiegen. Die anfänglich stark eingeschränkte Auswahl der »Reaktor-Bestandteile« weitete sich auf nahezu unübersehbare Weise aus« (Müller 1990: 397), als die reaktorphysikalische Forschung gegen Ende der vierziger Jahre auf breiter Basis einsetzte. Alvin Weinberg hat 1955 auf der Genfer Atomkonferenz sogar von mehr als hundert theoretisch möglichen Reaktortypen gesprochen. Wenngleich sich diese theoretisch mögliche Vielfalt in der Praxis auf zehn bis fünfzehn Reaktortypen reduzierte, ließen sich deren Vor- und Nachteile jedoch nicht eindeutig gegeneinander abwägen. »Daher ist die Frühphase der Kerntechnik durch Unsicherheit hinsichtlich der als optimal anzusehenden Reaktortypen und durch lang andauernde Typenkontroversen gekennzeichnet« (Radkau 1984: 208), in denen die alternativen konstruktiven Prinzipien geradezu leidenschaftlich diskutiert wurden.

Diese Typenvielfalt und die Unsicherheit bei der Wahl eines optimalen Reaktors hatten bereits beim »run« (Müller 1990: 242) der Länder auf die ersten Forschungsreaktoren, der kurze Zeit vor der Gründung und parallel zur Arbeit der Atomkommission einsetzte, dazu geführt, daß deren Auswahl stark von lokalen Präferenzen geprägt worden war. Noch bevor das BMat eigene inländische Entwicklungen zu fördern begann, hatten die Länder Bayern, Berlin, Hamburg, Hessen und Nordrhein-Westfalen mit finanzieller Unterstützung des Bundes sechs Forschungsreaktoren amerikanischer und britischer Herkunft geordert, die fünf unterschiedlichen Reaktorlinien entsprachen.⁴⁸ Allein das Land Nordrhein-Westfalen, das einen besonderen Ehrgeiz in der Förderung der Atomforschung entwickelte, hatte 1956 mit den beiden britischen Entwicklungen MERVIN und DIDO, zwei verschiedene Reaktortypen erworben und auf dem Gelände der Kernforschungsanlage Jülich (KfA) errichten lassen, die als gemeinsame »Reaktorstation« seiner Technischen Hochschulen und Universitäten in Aachen, Bonn, Köln und Münster dienen sollten. Die Auswahl der Reaktoren für die Kernforschungsanlage Jülich erfolgte dabei weniger unter wissenschaftlich-technischen Gesichtspunkten als vielmehr aufgrund der engen Beziehungen, die das Land zur britischen Regierung als seiner ehemaligen Besatzungsmacht unterhielt (Müller 1990: 292). Mit dem Münchener »Atomei« und den Forschungsreaktoren anderer Bundesländer verhielt es sich ähnlich. Hier variierte die Auswahl der Reaktoren mit den jeweiligen Forschungsinteressen der Hochschul institute und war ebenfalls stark gelegenheitsorientiert.

Auch die Entscheidung über das Design des ersten in der Bundesrepublik entwickelten Forschungsreaktors hing in hohem Maße von idiosynkratischen Präferenzen ab. Diese erste bundesdeutsche Eigenentwicklung entstand am Kernforschungszentrum Karlsruhe, das 1956 unter finanzieller Beteiligung des Bundes durch das Land Baden-Württemberg und einem Industriekonsortium gegründet wurde. Die wissenschaftliche Leitung des Projekts lag bei dem Kernphysiker Karl Wirtz, der mit seiner »Neutronengruppe« vom Max-Planck-Institut für Physik an die Reaktorstation in Karlsruhe übersiedelte und dort den Schwerwasserreaktor »F2« entwickelte, mit dem in der Bundesrepublik nunmehr insgesamt sechs unterschiedliche Reaktortypen installiert waren.

48 Im einzelnen waren dies das Münchener »Atomei«, der Berliner Experimental-Reaktor, der Forschungsreaktor Geesthacht, als gemeinsames Projekt der Küstenländer Bremen, Hamburg und Schleswig-Holstein, der Forschungsreaktor Frankfurt der Länder Hessen und Niedersachsen sowie die Reaktoren MERVIN und DIDO in Nordrhein-Westfalen. Eine synoptische Darstellung der Forschungsreaktoren, die in frühen fünfziger Jahren in der Bundesrepublik in Betrieb gingen, findet sich bei Otto Keck (1984: 58).

Wirtz hatte sich als Mitarbeiter von Heisenberg bereits während des Zweiten Weltkrieges mit der Entwicklung des Schwerwasserreaktors von Haigerloch befaßt, der jedoch aufgrund des Mangels an D₂O nicht kritisch wurde. Mitte der fünfziger Jahre knüpfte er an diese Arbeiten wieder an und gewann hierfür die Unterstützung insbesondere der Farbenfabriken Bayer und der Farbwerke Hoechst, die in diesem Reaktortyp die Chance sahen, künftig große Mengen an schwerem Wasser abzusetzen. In Folge des großen Interesses der chemischen Industrie am Schwerwasserreaktor beteiligte sich dann auch der Anlagenbau und die Konzerne AEG, Demag, Degussa, Krupp, Mannesmann, Metallgesellschaft und Siemens an dem Projekt in Karlsruhe (Müller 1990: 209).

Die Deutsche Atomkommission monierte zwar die große Zahl unterschiedlicher Reaktortypen, die von den Ländern um die Mitte der fünfziger Jahre in der Bundesrepublik errichtet wurden, und forderte sie dazu auf, ihre Aktivitäten besser miteinander abzustimmen, war aber auch ihrerseits weit davon entfernt, den Einstieg der Bundesrepublik in die Kernenergie koordinieren zu können. Ihr Memorandum war »keineswegs der verbindliche Wegweiser für den Einstieg zur Nutzung der Kernenergie in Kernkraftwerken, als der es in der Öffentlichkeit angesehen und vielfältig diskutiert wurde« (ebd.: 377–379). Was die mittelfristig zu entwickelnden Leistungsreaktoren anging, sprach sich das Programm von 1957 für vier bis fünf unterschiedliche Reaktortypen mit einer Gesamtleistung von 500 MW aus, deren Auswahl sich an den Projekten orientierte, die ohnehin von den Unternehmen verfolgt wurden, die in der Kommission vertreten waren. Insofern handelte es sich bei ihrem Memorandum weniger um wissenschaftlich-technisch angeleitete Empfehlungen, es »war vielmehr nur eine Unterstützung der Pläne einiger deutscher Industriefirmen« (ebd.: 379), die in der Fachwelt durchaus nicht auf ungeteilte Zustimmung traf und vor allem bei den Unternehmen, deren Reaktorprojekte nicht berücksichtigt worden waren, heftige Kritik hervorrief. So sah sich die Deutsche Atomkommission denn auch nur ein Jahr nach der Verabschiedung des »Eltviller-Programms« dazu gezwungen, ihre Vorschläge zu revidieren und eine Reihe weiterer Reaktortypen in ihre Empfehlungen aufzunehmen. In ihrem revidierten Memorandum von 1958 wählte sie im Hinblick auf die technische Auslegung der Kraftwerke zudem sehr viel vorsichtigere Formulierungen als zuvor, indem sie von Entwicklungstendenzen sprach, statt sich auf bestimmte Konstruktionsprinzipien und Reaktortypen festzulegen.

Mit der Revision ihrer ursprünglichen Empfehlungen vergrößerte die Atomkommission jedoch nur die bestehende Unsicherheit der Industrie und

vor allem der Energieversorgungsunternehmen (EVU) bei der Entscheidung für eine bestimmte Reaktorlinie. Die Versorgungsunternehmen standen der Kernenergie ohnehin skeptisch gegenüber, scheuten die hohen Investitionskosten für Atomkraftwerke und bezweifelten die Wirtschaftlichkeit solcher Anlagen. Um so mehr ließ sie der Mangel an einem Standardreaktor, der klar umrissene Eigenschaften und erkennbare Vorteile besaß, mit der Bestellung von Kernkraftwerken zögern (zur atompolitischen Haltung der EVUs vgl. vor allem Keck 1984: 82–90). Da die Kraftwerkshersteller ihrerseits nicht bereit waren, die Entwicklung von Leistungsreaktoren ohne konkrete Aufträge in Angriff zu nehmen, schloß sich ein »vicious circle«, durch den die deutsche Atompolitik am Ende der fünfziger Jahre in Stagnation geriet. Der atompolitische Enthusiasmus, den die Genfer Konferenz 1955 in der Bundesrepublik ausgelöst hatte, wich zu dieser Zeit einer tiefen Enttäuschung über die ausbleibenden Erfolge der deutschen Kernenergiepolitik. Im Jahr 1958 sprach das BMAf offen davon, daß das deutsche Atomprogramm sich in einer Krise befand und zu scheitern drohte, da sich noch immer kein einziger Leistungsreaktor im Bau befand oder auch nur in Auftrag gegeben worden war. Diese blockierte Situation durchbrach dann noch im selben Jahr das Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk (RWE) durch einen atompolitischen Alleingang, indem es am BMAf und an der Deutschen Atomkommission vorbei am 13. Juni 1958 den Auftrag für den Bau eines in den USA entwickelten Leichtwasserreaktors erteilte. Der Auftrag für diesen ersten Leistungsreaktor in der Bundesrepublik ging an die AEG, die das Kraftwerk in Lizenz des amerikanischen Konzerns General Electric in Kahl errichtete und drei Jahre später schlüsselfertig an das RWE übergab. Da das RWE keine öffentliche Förderung für den Bau dieses Kraftwerks beantragt hatte und seine Order wie im Fall einer konventionellen Anlage abwickelte, kam auch die Koordinationsfunktion des BMAf und der Deutschen Atomkonferenz nicht zum Tragen. Deren Beteiligung hatte das Versorgungsunternehmen gezielt umgangen, um einen kleineren Reaktor als die im Atomprogramm vorgesehenen 100-MW-Anlagen bauen zu können, der ihm weniger zur kommerziellen Stromerzeugung, als hauptsächlich dazu diente, Erfahrungswerte über die tatsächlichen Kosten für den Bau und Betrieb eines Kernkraftwerks zu sammeln (Radkau 1984: 192).

Gleichwohl trug die Bestellung dieses Leichtwasserreaktors von General Electric durch das RWE entscheidend dazu bei, daß dieser Reaktortyp Anfang der sechziger Jahre einen weltweiten Siegeszug antrat und sich zum Standardreaktor der nuklearen Stromproduktion schlechthin entwickelte. Dieser Siegeszug basierte auf einem klassischen »Lock-in-Prozeß«, mit dem

sich ganz wie in dem von Paul David (1958) beschriebenen Fall der QWERTY-Tastatur durch einen »historischen Zufall« (Arthur 1989) eine unter technologischen und energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten inferiore Technik gegenüber konkurrierenden Entwürfen durchsetzte (Bupp/Derian 1981).

Der Leichtwasserreaktor war ursprünglich nicht zum Zweck der industriellen Stromproduktion, sondern im Auftrag der amerikanischen Marine als Antriebsaggregat der neuen Generation von Unterseebooten vom Typ der »Nautilus« entwickelt worden. Dabei standen anfänglich weder die Investitions- noch die Betriebskosten dieses Reaktortyps im Vordergrund. Das Ziel, das die amerikanische Regierung mit dem Leichtwasserreaktor verfolgte, bestand einzig und allein darin, in dem sich am Ende der vierziger Jahre anbahnenden Wettüsten mit der UdSSR möglichst schnell über ein funktionierendes nukleares Antriebsaggregat zu verfügen, das ihre U-Boot-Flotte von den sauerstoffverbrauchenden Dieselmotoren unabhängig machte und Tauchfahrten von großer Reichweite erlaubte.

Die Entwicklung des Leichtwasserreaktors war eng mit der Person und den militärpolitischen Interessen des U-Boot-Kapitäns und späteren Rear Admirals, Hyman G. Rickover, verbunden, der mit diesem Reaktortyp »ein Crash-Programm zum Erfolg« (Müller 1990: 400) führte. Rickover setzte sich mit der Förderung dieser Technologie in der Diskussion über die Konstruktionsprinzipien geeigneter nuklearer Schiffsantriebe am Ende der vierziger Jahre über alle Einwände und Bedenken der Kernphysiker in der amerikanischen Atomkommission hinweg. Zu dieser Zeit gab es »certainly no consensus among the physicists that it was the best. They felt that much more study was needed before a sensible choice could be made« (Cowan 1990: 559). Doch Rickover ging es nicht um den besten, sondern um den nuklearen U-Bootantrieb, der am schnellsten verfügbar war, und dazu bot sich aufgrund seiner vergleichsweise einfachen Reaktorphysik, der kompakten Bauweise und seines hohen Anteils an konventioneller Technik der Leichtwasserreaktor an. Rickover genügte der Hinweis eines einzigen Physikers, daß sich der Leichtwasserreaktor prinzipiell und in relativ kurzer Zeit entwickeln lassen müsse, um in der U.S. Navy all seinen Einfluß für den Bau eines entsprechenden U-Bootantriebs geltend zu machen.

Die Navy beauftragte 1948 den amerikanischen Elektrokonzern Westinghouse, der sich bis dahin noch nicht mit der Kerntechnik befaßt hatte, mit der Entwicklung des Prototyps eines Druckwasserreaktors, den das Unternehmen unter der Bezeichnung Mark I im Jahr 1953 fertigstellte und an Land errichtete. Mark II wurde dann in dem Unterseeboot »Nautilus« installiert,

das 1954 seine Jungfernfahrt absolvierte. Die Jungfernfahrt von »Nautilus« markierte zugleich den Beginn eines Bauprogramms des amerikanischen Verteidigungsministeriums, in dem bis 1962 insgesamt 58 atomgetriebene und sämtlich mit Leichtwasserreaktoren ausgestattete U-Boote entstanden. Um Westinghouse keine Monopolstellung bei der Lieferung der U-Bootantriebe zu ermöglichen, beauftragte die Navy auch den Elektrokonzern General Electric mit der Entwicklung eines Leichtwasseraggregats, der daraufhin seine Arbeiten an einer metallgekühlten Anlage weitgehend einstellte und sich auf den Bau dieses Reaktortyps beschränkte (Cowan 1990: 559).

Damit stand nun der Leichtwasserreaktor in den USA genau zu dem Zeitpunkt als der einzige »erprobte« Reaktor zur Verfügung, als die zivile Kraftwerkstechnologie im Rahmen des »Atoms-for-Peace-Programms« von 1953 in der amerikanischen Atompolitik Vorrang vor der militärischen Nutzung der Kernenergie erhielt. Um im nationalen Sicherheitsinteresse »energiehungrigen« Ländern eine Alternative zu sowjetischen Reaktoren bieten zu können, beauftragte die amerikanische Atomkommission im Jahr 1953 Westinghouse mit dem Bau eines stationären Leichtwasserreaktors in Shippingport, der als das erste Kernkraftwerk der USA im Dezember 1957 kritisch wurde und noch im selben Monat seine volle Leistung erreichte (Bupp/Debian 1981: 42–44).

Wie bereits bei der Entscheidung für den Leichtwasserreaktor als U-Bootantrieb hatten also auch bei der Wahl dieses Reaktortyps für die Elektrizitätserzeugung nicht wissenschaftliche und ökonomische Gründe, sondern ausschließlich seine rasche Verfügbarkeit den Ausschlag gegeben. Der Reaktor in Shippingport wurde errichtet »to prove American nuclear superiority, not to lower energy costs« (Cowan 1990: 563). Er arbeitete keineswegs wirtschaftlich und war weit davon entfernt, mit fossilen Kraftwerken konkurrieren zu können.

Dem relativ niedrigen Investitionsaufwand für Leichtwasserreaktoren stand der gravierende Nachteil gegenüber, daß sich durch die Verwendung von H_2O als Moderator nur das seltene Isotop U-235 spalten und dementsprechend nur angereichertes Uran verwenden ließ. Dies verursachte sehr hohe Betriebskosten, die den vergleichsweise geringen Investitionsaufwand schnell überwogen, und machte die Leichtwasserlinie zunächst zu einer wenig attraktiven Alternative für die nukleare Stromerzeugung.

Nichtsdestoweniger entschieden sich die europäischen und vor allem die deutschen Energieversorgungsunternehmen (EVU) mehrheitlich für diese Reaktorlinie. Für die Versorgungsunternehmen war ausschlaggebend, daß dieser Reaktortyp mit seinen niedrigen Baukosten noch das geringste Investi-

tionsrisiko beim Einstieg in die Kernenergie darstellte und es damit erleichterte, aus der nuklearen Stromproduktion auch wieder auszusteigen, wenn sie sich als zu kostspielig erwies (Interview XXXIV). Noch im selben Jahr, in dem das RWE den Leichtwasserreaktor in Kahl bestellte, orderten Frankreich und Belgien im Rahmen eines Kooperationsprojekts in den USA ebenfalls ein Kraftwerk dieses Typs, das in Chooz an der französisch-belgischen Grenze errichtet wurde. Dem folgte Italien mit einem Leichtwasserkraftwerk in Garigliano und wiederum die Bundesrepublik mit einem zweiten Leistungsreaktor dieser Art in Grundremmingen. Diese europäischen Aufträge lösten ihrerseits einen »great bandwagon market for light water« (Bupp/Derian 1981: 42–55) in den USA aus und induzierten dort den kommerziellen Durchbruch der nuklearen Kraftwerkstechnik. Im Zuge wachsender Skaleneffekte sanken die Herstellungskosten der Leichtwasserreaktoren deutlich ab und näherten sich denen konventioneller Kraftwerke an. Als Signal für den kommerziellen Durchbruch der Kernenergie galt weltweit der im Jahr 1963 von der Jersey Central Power and Light Company an General Electric erteilte Auftrag zum Bau eines 515-MW-Leichtwasserreaktors in Oyster Creek (Bupp/Derian 1981: 42–43).

Dieser Auftrag erfolgte erstmals unter reinen Marktbedingungen. Jersey Central begründete ihre Entscheidung damit, daß der Reaktor in Oyster Creek Elektrizität zu günstigeren Preisen liefern werde als jedes andere Stromerzeugungssystem und nahm keine öffentlichen Mittel für den Bau der Anlage in Anspruch. Oyster Creek »was widely regarded as a milestone in the development of nuclear power reactor technology« (Bupp/Derian 1981: 42) und löste jetzt im internationalen Maßstab das »lock-in« des Leichtwasserreaktors aus. In der Bundesrepublik trat dieser Reaktortyp in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre mit den Standorten Stade, Würgassen und Biblis seinen endgültigen Siegeszug an, und von den insgesamt 404 Atomkraftwerken, die heute einschließlich der Anlagen in den früheren RGW-Ländern weltweit in Betrieb sind, handelt es bei 311 und damit bei rund 77 Prozent um Leichtwasserreaktoren (Müller 1990: 405).

3.3 Brutreaktoren als kerntechnisches Optimum und Weg in die Großforschung

Mit dem einsetzenden Siegeszug des amerikanischen Leichtwasserreaktors am Beginn der sechziger Jahre war das Deutsche Atomprogramm nun tatsächlich weitgehend gescheitert. Nachdem sich die Versorgungsunternehmen für diesen Reaktortyp entschieden hatten, begann sich die Industrie aus den laufenden Projekten zurückzuziehen. Die Chemiekonzerne Bayer und Hoechst verloren das Interesse an dem Projekt in Karlsruhe, als es sich abzeichnete, daß in der nuklearen Stromerzeugung kein Bedarf an schwerem Wasser entstehen würde. Das Kooperationsprojekt für den Bau des dortigen Schwerwasserreaktors »F2« fiel in den frühen sechziger Jahren auseinander und die Existenz des Kernforschungszentrums schien zu diesem Zeitpunkt ernsthaft gefährdet (Keck 1984: 98). Auch die Kraftwerks- und Maschinenbauindustrie ließ ihre ursprünglichen Pläne fallen und verzichtete auf die vorgesehene Entwicklung eigener Reaktoren. Wie zuvor die AEG bei General Electric erwarb Siemens bei dem amerikanischen Hersteller Westinghouse eine Lizenz für den Bau von Leichtwasserreaktoren (Müller 1990: 11–418).

Dennoch folgte auf eine kurze Phase der Enttäuschung über das Scheitern der Reaktorprojekte sehr bald eine erneute Aufbruchstimmung in der deutschen Atompolitik. Nachdem sich die Versorgungsunternehmen für den amerikanischen Leichtwasserreaktor entschieden hatten, bildete sich in der Bundesrepublik rasch ein breiter Konsens darüber heraus, daß sich angesichts des Siegeszugs dieses Kraftwerktyps die Entwicklung von vergleichbaren Leistungsreaktoren nicht mehr lohnte, es aber nun um so dringlicher war, früher als ursprünglich geplant den Bau von Brutkraftwerken der zweiten Reaktorgeneration voranzutreiben (Interview XIV). Mit dem Leichtwasserreaktor war zwar der Einstieg in die nukleare Stromproduktion vollzogen, doch zugleich konnte gerade dieser Reaktor nur eine »Interimslösung« (Cowan 1990: 566) sein. Die Leichtwasserlinie »streckte nur das Öl« (Interview XIV) und nutzte nur einen Bruchteil des Energiepotentials, das im Natururan enthalten war. Ihr Siegeszug lief damit im Rahmen des damaligen atompolitischen Deutungsmusters auf eine immense Energievergeudung hinaus und mußte langfristig die teuerste aller denkbaren Lösungen sein. Zudem gefährdete der Leichtwasserreaktor das ursprüngliche Ziel einer sich weitgehend selbst tragenden Atomwirtschaft, die in möglichst großem Umfang Natururan für die nukleare Energieerzeugung einsetzte und machte die Bundesrepublik vom Import angereicherter Brennstoffe aus dem Ausland abhängig. Das »lock-in« der Leichtwasserlinie zog damit als logische

Konsequenz nach sich, die atompolitischen Anstrengungen jetzt auf die Entwicklung der Brutreaktoren zu konzentrieren, die das Potential des Natururans optimal ausschöpften und die Kernenergie langfristig preiswerter machten. Die atompolitische Diskussion in den USA und in den europäischen Nachbarstaaten wies im übrigen in dieselbe Richtung. Auch die amerikanische Atomkommission hatte den Leichtwasserreaktor nur als zeitlich begrenzte Zwischenlösung betrachtet, als sie das Kraftwerk in Shippingport errichten ließ. In den USA lagen – wie in England und Frankreich – am Ende der fünfziger, Anfang der sechziger Jahre bereits konkrete Pläne für die Entwicklung der neuen Generation von Brutkraftwerken vor (vgl. zu den internationalen Vorhaben Overbeck 1992: 6–7).

Mit dem einsetzenden Siegeszug des Leichtwasserreaktors brach dann die Diskussion in der Bundesrepublik über die Vor- und Nachteile der verschiedenen Leistungsreaktoren geradezu abrupt ab und ging in eine Debatte über die physikalischen und technischen Voraussetzungen von Brutkraftwerken und der mit ihnen zu erzielenden Brutraten über (Radkau 1983: 418–423). Wengleich auch im Falle dieser Kraftwerke unterschiedliche Typen denkbar waren, so stand doch fest, daß nur Reaktoren, die mit schnellen Neutronen arbeiteten, das Natururan in optimaler Weise nutzen konnten. Dies führte dazu, daß man um 1960 zwischen sogenannten Konvertern, die weniger Brennstoff erzeugten, als sie selbst verbrauchten, und Brüttern, die mehr Spaltmaterial produzierten, als sie für ihren Betrieb benötigten, zu unterscheiden begann. Der Begriff des Brutreaktors wurde damit praktisch synonym mit dem Schnellen Brüter, als dem einzigen Reaktortyp, dessen Brutrate »größer eins« lag (Radkau 1984: 210; Michaelis 1986: 105–117).

Allerdings war die Reaktorphysik eines Schnellen Brüters auch um einiges komplexer und bereitete sehr viel größere Probleme als die reiner Leistungsreaktoren oder Konverter, bei denen moderierte oder »abgebremste« Neutronen zum Einsatz kamen. »An der Physik dieser Reaktortypen gab es nicht mehr viel tun« (Keck 1984: 96–97), während die Entwicklung eines Schnellen Brüters weit mehr als rein ingenieurtechnisches Wissen verlangte und sehr sorgfältig an der reaktorphysikalischen Seite ansetzen mußte. Obwohl mit dem EBR I (Experimental Breeder Reactor) in den USA bereits seit 1951 ein Reaktor von General Electric zu experimentellen Zwecken betrieben wurde, der mit schnellen Neutronen arbeitete, waren die reaktorphysikalischen Eigenschaften dieses Kraftwerktyps aber noch nicht ausreichend erforscht. Der EBR I war eine sehr kleine Anlage, die um die 100 kW produzierte und noch keine Rückschlüsse auf Anlagen von industriellem Maßstab zuließ (Müller 1990: 8).

Das reaktorphysikalische Hauptproblem eines Schnellen Brütters lag in seinem positiven Void-Koeffizienten. Dieser Koeffizient war ein Maßstab für die Dopplereffekte, die schnelle Neutronen mit der Folge unkontrollierbarer Leistungsexkursionen des Reaktorkerns erzeugen konnten. Um einen negativen Void-Koeffizienten zu erzielen, mußte das neutronenökonomische Design des Kerns und der Kühlkreisläufe eines schnellen Brutreaktors besonderen Anforderungen genügen. Da man bei einem solchen Reaktor auf Moderatoren verzichten mußte, ließen sich die Spaltprozesse innerhalb des Kerns nur über das Kühlmittel regulieren, das aber seinerseits wiederum nicht als Moderator wirken und auch keine Neutronen absorbieren durfte. Es mußte aufgrund der hohen Leistungsdichte von Brutreaktoren zudem auf engstem Raum konstant große Mengen von Wärme aufnehmen können, da schon geringe Abweichungen von einer optimalen Temperatur nicht nur zu einer Leistungsexkursion, sondern auch zu dem gegenteiligen Effekt führen konnten, daß eine Vielzahl von Isotopen entstand, die den Reaktor »vergiften« und die Kettenreaktion zum Erliegen bringen konnten.⁴⁹ Angesichts seiner reaktorphysikalischen Komplexität zweifelten am Beginn der sechziger Jahre daher nicht wenige Experten noch daran, daß sich der Schnelle Brüter verwirklichen ließe. Diese Skepsis wich dann allerdings um die Mitte des Jahrzehnts einer allgemeinen »Brüter-Euphorie«, mit der dieser Reaktor zum alles dominierenden Entwicklungsziel der deutschen Atompolitik wurde (Radkau 1983: 209).

Um Klarheit über die prinzipielle reaktorphysikalische Realisierbarkeit eines schnellen Brutreaktors zu erlangen, beauftragte die Deutsche Atomkommission 1959 den Schüler Werner Heisenbergs und Abteilungsleiter am Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik des Kernforschungszentrums Karlsruhe, Wolf Häfele, im Rahmen eines Studienaufenthalts in den USA damit, eine Art »feasibility study« zu dieser Frage durchzuführen. Häfele konnte nach seiner Rückkehr vom Oak Ridge National Laboratory die deutsche Fachwelt davon überzeugen, daß sich die Probleme des positiven Void-Koeffizienten und der »Vergiftung« des Reaktorkerns durch die unkontrollierte Bildung von Isotopen prinzipiell lösen ließen, und begann 1960 als Leiter der vom BMAf geförderten Projektgruppe Schneller Brüter in Karlsruhe mit den Vorstudien für die Entwicklung eines solchen Kraftwerks. Häfeles Projektgruppe besaß den Auftrag, die physikalischen und

49 Die reaktorphysikalischen Probleme, die bei der Entwicklung des Schnelles Brütters zu bewältigen waren, sind ausführlich beschrieben in Kernforschungszentrum Karlsruhe (1965), Marth (1992), vgl. auch Michaelis (Hrsg., 1986: 105–117).

technischen Konstruktionsprinzipien eines Schnellen Brütters zu erarbeiten und der Frage nach geeigneten Kühlmitteln nachzugehen, um 1963 einen Vorschlag für das Design eines entsprechenden Reaktors zu unterbreiten (Keck 1984: 96–101).

Sein Bericht von 1963, der zugleich als Projektantrag für den Bau des Prototyps eines schnellen Brutkraftwerks fungierte, traf in der atom- und forschungspolitischen Situation um die Mitte der sechziger Jahre auf außerordentlich günstige Rahmenbedingungen und leitete nun auch die Ära der »big science« in der Bundesrepublik ein. Die Entscheidung der Bundesregierung, die Entwicklung eines solchen Kraftwerks in Angriff zu nehmen, war stark von der Signalwirkung motiviert, die 1963 von der Order des Reaktors in Oyster Creek ausging. Diese Order schien zu beweisen, daß die Kernenergie jetzt wettbewerbsfähig wurde. Sie zeigte zugleich aber auch, daß sich mit dem Leichtwasserreaktor die fragwürdigste und langfristig teuerste Lösung durchsetzte und man deshalb unverzüglich mit der Entwicklung von Brutkraftwerken beginnen mußte (Interview XXXVII).

Einer der führenden amerikanischen Hersteller des Leichtwasserreaktors lieferte nur ein Jahr später den endgültigen Beweis hierfür. General Electric kündigte 1964 ebenfalls die Entwicklung eines schnellen Brutkraftwerks an, das seine Leichtwasserlinie künftig ablösen sollte (Keck 1984: 144). Wenngleich dem deutschen Reaktorprojekt damit eine mächtige Konkurrenz erwuchs, bestätigte diese Ankündigung doch nur den in der Bundesrepublik eingeschlagenen Weg. Der erwartete internationale Wettbewerb auf dem Gebiet der Bruttechnik schien jetzt tatsächlich eröffnet zu sein (Interview XXXVII).

Begünstigt wurde die Entscheidung für den Bau des Schnellen Brütters nicht zuletzt von der Ablösung des BMA_t durch das Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) im Jahr 1962, auf das auch die atompolitische Kontrolle übergang. Die institutionellen Eigeninteressen des Bonner Forschungsministeriums konditionierten durchaus »Wohlwollen« (Keck 1984: 294) innerhalb des neuen Ressorts gegenüber dem Karlsruher Projektantrag und trafen sich unmittelbar mit den Interessen des Forschungszentrums an einem großen Nachfolgeprojekt für den Schwerwasserreaktor, aus dessen Weiterentwicklung und Finanzierung sich die Industrie bereits zurückzog.

Mit dem BMwF war auf der Bundesebene ein eigenständiger forschungspolitischer Akteur entstanden, der seine Aufgaben noch definieren mußte, aber zugleich in dem nach wie vor anhaltenden Kompetenzkonflikt mit den Ländern auf die Förderung einer anwendungsorientierten Forschung be-

schränkt war, die »zwischen« der akademischen Grundlagenforschung und der industriellen Entwicklung lag. Diesem Akteur bot sich mit dem Projekt Schneller Brüter die überaus attraktive Chance, rasch eine führende Rolle in der Forschungspolitik zu übernehmen und durch den Ausbau des Karlsruher Forschungszentrums eine eigene »Hausmacht« aufbauen zu können, ohne die ihm von den Ländern auferlegten forschungspolitischen Beschränkungen zu verletzen (vgl. dazu ausführlich Stucke 1993: 97–105).

Das Projekt verband in zielorientierter Weise Grundlagenforschung mit technischer Entwicklung und diente im »gesamtstaatlichen« Interesse der langfristigen Sicherung der nationalen Energieversorgung und der internationalen Konkurrenzfähigkeit der Bundesrepublik. In dieser Situation lag es für das BMwF nahe, an das in den USA entwickelte Modell der staatlich gesteuerten »big science« anzuknüpfen und sich mit der Großforschung und der Förderung der »Projektwissenschaften« eine eigene und von den Ländern unabhängige forschungspolitische Domäne zu schaffen, zumal auch die Karlsruher Projektleitung, die stark von den Ideen Alvin M. Weinbergs, dem Promotor der Großforschung in den USA, inspiriert war, die Gründung von »National-Laboratorien« in der Bundesrepublik forderte (Häfele 1963: 27).

Anders als im Fall der Leistungsreaktoren ging es bei dem Bau des Schnellen Brütters auch nicht mehr darum, innerhalb eines kurz- oder mittelfristigen Zeitrahmens eine bestimmte Technologie bereitzustellen und am Markt durchzusetzen. Die Entwicklung dieses Reaktors galt vielmehr als eine langfristige Aufgabe, die im Dienst einer vorausschauenden Energiepolitik und nationalen Zukunftsvorsorge stand. Obwohl man sich sowohl in Karlsruhe wie in Bonn auf optimistische Prognosen über die baldige Konkurrenzfähigkeit des Schnellen Brütters mit den Leichtwasserreaktoren und konventionellen Anlagen zur Stromerzeugung stützte, wurde das Projekt nie unmittelbar an marktwirtschaftlichen Kriterien gemessen (Radkau 1984).

Das Ziel, das diesem Projekt zugrunde lag, bestand vielmehr darin, die hohen Vorlauf- und Investitionskosten für den Brutreaktor langfristig durch die Erzeugung großer Mengen von nuklearem Spaltmaterial auszugleichen, dessen Preise kontinuierlich sanken, während sich die fossilen Energievorkommen aller Voraussagen nach stetig verknappten und teurer werden mußten. Mit dem preiswerten, in Brütern erzeugten Brennstoff ließen sich dann auch die Leichtwasserreaktoren betreiben, bis sie als Zwischenlösung durch die neue Generation von Kernkraftwerken ohnehin abgelöst wurden. Im Rahmen dieser auf lange Sicht angelegten atompolitischen Strategie ging man davon aus, daß die ersten Prototypen dieser neuen Kraftwerksgeneration um die Mitte der siebziger Jahre zur Verfügung stehen würden und sich

Brutreaktoren dann etwa zehn Jahre später allmählich als konkurrenzfähig erweisen würden (Kernforschungszentrum Karlsruhe 1965: 2–9; Häfele 1984).

3.4 Aufgabenstruktur und Funktionsweise der kerntechnischen Großforschung

Wie später kein anderes Großforschungsvorhaben mehr machte das Projekt Schneller Brüter dann auch tatsächlich Furore. Mit diesem Projekt avancierte die ehemalige Reaktorstation Karlsruhe nicht nur zur ersten Großforschungseinrichtung des Bundes, sondern auch zum Vorbild der staatlichen Forschungsorganisation in der Bundesrepublik schlechthin. Allerdings basierte der Erfolgskurs, den das Kernforschungszentrum Karlsruhe einschlug, auch auf Voraussetzungen, wie sie in dieser Weise kaum mehr eines der Forschungsfelder bot, auf denen der Bund nach dem Vorbild des Karlsruher Zentrums später weitere Großforschungseinrichtungen gründete.

Die Arbeit des Karlsruher Zentrums blieb nicht nur vollkommen frei von theoretischen und methodischen Irritationen, sondern litt mit dem Schnellen Brüter als der im damaligen atompolitischen Deutungsrahmen bestmöglichen Lösung unter den alternativen Reaktorkonzepten auch nie unter Zielkonflikten. Dementsprechend konnten die Aktivitäten des Kernforschungszentrums auf den Bau einer einzigen großen Maschine gebündelt werden und sich zugleich stabile und eng gekoppelte »Lieferbeziehungen« zwischen der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung des Zentrums und der ingenieurtechnischen Entwicklung in der Industrie herausbilden. Die hohe Fertigungstiefe, die sich mit der Entwicklung dieser komplexen Maschine verband, ließ sich durch die Zerlegung der Arbeitsaufgaben in eine serielle Aufgabenordnung mit funktionaler Arbeitsteilung und im Rahmen einer hierarchisch strukturierten Arbeitsorganisation mit vielen Zwischenhierarchien bewältigen. Die organisatorische Struktur des Projekts Schneller Brüter entsprach damit in geradezu prototypischer Weise einem bürokratischen Modell von Transferorganisation im Sinne des Schemas von Whitley, das sich bei allen Konflikten und Reibungsverlusten, die auch in diesem Projekt auftraten, als eine durchaus effiziente Form der staatlichen Forschungsförderung erwies.

Rückblickend und vor allem im Vergleich zu anderen Großforschungseinrichtungen war der Forschungs- und Transferprozeß im Fall des Projekts

Schneller Brüter erstaunlich arm an intraorganisatorischen Auseinandersetzungen und interorganisatorischen Konflikten. Innerhalb des Kernforschungszentrums traf das Projekt auf große Begeisterung und machte sehr bald die »corporate identity« dieser Forschungsorganisation aus, die ihre Arbeit durchaus im Sinne einer Mission verstand. Die Entwicklung des Schnellen Brütlers sicherte nicht nur auf lange Zeit die Existenz des Karlsruher Zentrums, sondern lief auch auf die große und integrative Aufgabe hinaus, »an erster Stelle bei der Entwicklung eines wichtigen Reaktortyps mitzuwirken« (Marth 1992: 3). Im Projekt Schneller Brüter mitzuarbeiten, brachte innerhalb des Kernforschungszentrums großes Prestige ein, und wann immer möglich wechselten Mitarbeiter aus anderen organisatorischen Bereichen in das Projekt von Häfele (Interview XXXVII).

Dieses Projekt wurde zudem um so enthusiastischer begrüßt, als mit ihm nach dem Scheitern des Schwerwasserreaktors⁵⁰ auch die Industrie an das Karlsruher Forschungszentrum zurückkehrte. Die Firmen Interatom und Siemens beziehungsweise AEG, GHH und MAN schlossen sich 1966 zu zwei Konsortien zusammen, um sich im Auftrag des BMwF an dem Bau von Forschungsreaktoren und des Prototyps eines Brutkraftwerks zu beteiligen. Auch Belgien und die Niederlande beteiligten sich mit den Firmen Belgonucléaire beziehungsweise TNO/Neratom über Assoziationsverträge mit EURATOM an dem Karlsruher Brüterprojekt (Marth 1992: 15, 23).

Die Führungskompetenz für das gesamte Vorhaben verblieb jedoch, solange die reaktorphysikalische Forschung im Vordergrund stand, beim Forschungszentrum Karlsruhe und dort beim Projekt Schneller Brüter, das von Häfele als Mitglied des Instituts für Neutronenphysik und Reaktortechnik geleitet wurde. Dieses Projekt überzog die ansonsten selbständigen Institute für Heiße Chemie, für Radiochemie, für Transurane und Plutoniumtechnologie sowie die Abteilungen für Reaktorkonstruktion und für Reaktorbetrieb des Karlsruher Zentrums mit einer Matrix-Struktur, in deren Rahmen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in sehr straffer Weise koordiniert und gebündelt wurden (Keck 1984: 98).

Nach den theoretischen Vorarbeiten von Häfeles Projektgruppe in den Jahren 1961 bis 1963 konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten des Karlsruher Zentrums zunächst auf die geometrische Auslegung des Reaktorkerns und die noch wenig bekannten Wirkungsquerschnitte schneller Neutronen innerhalb dieses Kerns. Die theoretische Modellierung der Neutro-

50 Der FR-2 wurde 1964 aber doch noch kritisch und hauptsächlich im Rahmen des Schnellbrüterprojekts zu Zwecken der Materialprüfung betrieben (Marth 1992: 2).

nenflüsse verlief parallel zum Bau der Schnellen Unterkritischen Anordnung Karlsruhe (SUAK) und dem Schnell-Thermischen Argonaut-Reaktor Karlsruhe (STARK) beziehungsweise der Installation eines Zyklotrons, das dann wie SUAK und STARK zur Messung der Wirkungsquerschnitte eingesetzt wurde und es erlaubte, auf empirischer Basis Neutronentransportgleichungen zu modellieren. Dem folgten in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre verschiedene Reaktorentwurfsstudien, deren primäres Ziel darin bestand, einen möglichst niedrigen Void-Koeffizienten mit einer möglichst hohen Brutrate zu verbinden. Das technische Gegenstück zu diesen Studien bestand wiederum im Bau der Schnelle-Nullenergie-Anordnung Karlsruhe (SNEAK), die es ermöglichte, schnelle Kerne von variabler Größe, Geometrie und Zusammensetzung aufzubauen und unterschiedliche Reaktoren experimentell zu simulieren (vgl. Marth 1992: 27–30).

Die Aufgabe der Modellierung und des Designs des Reaktorkerns lag dabei in der Hand der Physiker, die in dieser Phase eine klare Führungsrolle gegenüber den Ingenieuren des Forschungszentrums und der beteiligten Industriekonsortien einnahmen. Ende der sechziger Jahre war dann die Reaktorphysik des Schnellbrüters weitgehend »ausgeforscht« (Interview XXII), während zugleich das physikalisch-technische Design des Kraftwerks in seinen Grundzügen feststand. Dieses Design basierte auf der sogenannten »Na 2-Studie«, die unter der Federführung von Wolf Häfele am Kernforschungszentrum Karlsruhe entstand und aus der sich alle wesentlichen Konstruktionsprinzipien für den SNR-300, einem durch flüssiges Natrium gekühlten Schnellen Brüter mit einer Leistung von 300 MW ableiteten (Marth 1992: 41–43). Die organisatorische Struktur, die dem Projekt Schneller Brüter zugrunde lag, entsprach damit recht genau dem seriellen Transfermodell, das Kline und Rosenberg in ihrer Kritik des klassischen linearen Transfermodells entwickelt hatten. Darin folgen auf theoretisch angeleitete Entwürfe von Artefakten und Verfahren experimentelle Tests, die über »feed-back-loops« sukzessive zur Anpassung der technischen Spezifikationen und schließlich zur Festlegung des endgültigen Designs führen (Kline/Rosenberg 1986).

Die stetigen Fortschritte, die von der Leitung des Projekts über die Entwicklung des SNR-300 vermeldet werden konnten, hatten zur Folge, daß das Kernforschungszentrum Karlsruhe in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre geradezu zum »Mekka« der »nuclear community« und eines stabilen forschungspolitischen Netzwerks in der Bundesrepublik avancierte, das zunehmend mit einer »breeder community« identisch wurde. Die jährlichen »Statusberichte«, zu denen die Leitung des Projekts Schneller Brüter nach

Karlsruhe einlud, wurden in der Öffentlichkeit, Politik und Wirtschaft mit wachsendem Interesse und Beifall verfolgt und brachten dem Forschungszentrum großes Renommee ein. Die anfänglichen Gegner des Schnellbrüterprojekts revidierten jetzt ihr Urteil oder verstummten. In der zweiten Hälfte der sechziger Jahre bestand in der Bundesrepublik kein Zweifel mehr daran, daß man mit diesem Projekt energiepolitisch den einzig richtigen Weg eingeschlagen hatte.⁵¹ Dies galt auch für die Forschungspolitik des Bundes, die angesichts des stabilen Erfolgskurses, den das Projekt Schneller Brüter einschlug, davon ausgehen konnte, mit dem Modell der Großforschung den geeigneten und angemessenen organisatorischen Rahmen für die öffentliche Förderung der angewandten Forschung gewählt zu haben (Interview XV).

Für diese Sicht der Dinge sprach um so mehr, als sich auch die Kooperation zwischen dem Forschungszentrum Karlsruhe und der Industrie so gut wie reibungslos anließ. Abgesehen von Patentkonflikten, die zum Teil sehr geräuschvoll in der Öffentlichkeit ausgetragen wurden, gab es keine nennenswerten Auseinandersetzungen zwischen dem Forschungszentrum und der Industrie. Alle Beteiligten verfolgten bei einer klaren Verteilung der Aufgaben und Kompetenzen ein gemeinsames Forschungs- und Entwicklungsziel, das von niemandem je in Frage gestellt wurde. Und auch in der Industrie war man davon überzeugt, mit dem Projekt Schneller Brüter eine wichtige energiepolitische Mission zu erfüllen (Interview XIX).

Mit dem weitgehenden Abschluß der »Na 2-Studie« und der beginnenden technischen Umsetzung des SNR-300 erhielt das Projekt 1966 einen neuen formellen organisatorischen Rahmen. In diesem ging die Leitung des Vorhabens von der Karlsruher Projektgruppe auf das Projektkomitee Schneller Brüter über, das sich unter dem Vorsitz des BMwF aus Vertretern des Landes, der Bundesregierung, der Herstellerindustrie, der Energieversorgungsunternehmen und der Wissenschaft zusammensetzte. Mit seiner Koordination durch dieses Komitee übernahm nun die Industrie

51 Die Begeisterung, die das Karlsruher Projekt auslöste, beschränkte sich nicht nur auf den engeren Kreis der »nuclear community« in der Bundesrepublik, sondern erfaßte auch die Medien und die breite Öffentlichkeit. Wie eine vom Autor dieser Arbeit zur Vorbereitung der Experteninterviews durchgeführte inhaltsanalytische Auswertung aller einschlägigen Berichte und Kommentare zeigt, die in den Jahren 1963 bis 1989 in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung (FAZ) und im Spiegel erschienen sind, der sich zusammen mit der FAZ später zu den schärfsten Kritikern des Schnellbrüterprojekts entwickelte, äußerten sich die dort veröffentlichten Artikel in den sechziger Jahren ausnahmslos affirmativ bis enthusiastisch über dieses Projekt.

mehr und mehr die Ausarbeitung und Verantwortung für das Projekt SNR-300 auf der Basis der Na 2-Studie. ... Dem Kernforschungszentrum Karlsruhe verblieben die Grundlagenforschung und teilweise die bauzugehörige Forschung und Entwicklung für den SNR-300. (Marth 1992: 39)

Angesichts des insgesamt weitgehend reibungslosen Verlaufs, den der Forschungs- und Transferprozeß im Projekt Schneller Brüter nahm, erregte der einzig wirklich nennenswerte Konflikt, der während seines Verlaufs auftrat, um so mehr Aufsehen und Irritationen. Dieser Konflikt entzündete sich 1966 an der Frage nach dem geeigneten Kühlmittel für den Reaktor, die anfänglich bewußt offen gehalten worden war, um bei dieser kritischen Entscheidung alle zur Verfügung stehenden Optionen gründlich gegeneinander abzuwägen zu können.

Prinzipiell standen mit Helium, flüssigem Natrium und Wasserdampf drei alternative Kühlmittel zur Regulierung des Reaktorkerns und Abtransports der Wärme zur Auswahl, für die das Kernforschungszentrum jeweils eigene Versuchskreisläufe errichtete. Allerdings schied Helium als das Kühlmittel mit den potentiell größten Vorteilen bereits frühzeitig aus dem Kreis der möglichen Lösungen aus. Dieses Kühlmittel erlaubte es im Prinzip, nicht nur einen sehr niedrigen Void-Koeffizienten mit einer hohen Brutrate zu verbinden, sondern bot auch im Hinblick auf die Reaktorsicherheit große Vorteile, da das Edelgas chemisch neutral war und sich gegenüber radioaktiver Strahlung weitgehend inert verhielt.

Bei der Durcharbeitung des Helium-Reaktorentwurfs zeigten sich jedoch auch bald die Nachteile dieses Kühlmittels. Der hohe Gasdruck, die großen Wärmetauscher, die hohe Pumpleistung, das voluminöse Druckgefäß, die unsichere Notkühlung und der Mangel an geeigneten Hüllmaterialien bargen schwerwiegende technische Probleme, die letztlich auch zu negativen wirtschaftlichen Konsequenzen geführt hätten. (Marth 1992: 27–28)

Aufgrund dieser Probleme hatte sich bereits auf der Argonne-Konferenz im Jahr 1963 ein internationaler Konsens darüber herausgebildet, daß die Nachteile der Heliumkühlung deren Vorzüge überwogen. »Danach war diese Kühlmittelvariante praktisch aus dem Rennen, und die weitere Entscheidung wurde zwischen Natrium und Dampf gesucht« (ebd.: 28). Die Entscheidung zwischen diesen beiden Varianten fiel jedoch schwerer und konnte sich lange Zeit nicht auf Konsens stützen.

Aufgrund der Unsicherheit darüber, welche der beiden verbleibenden Kühlmittel sich besser eignete, wurden in Karlsruhe über Jahre hinweg beide Varianten als gleichwertig behandelt und parallel verfolgt (Keck 116–118).

Als dann gegen Ende der sechziger Jahre die Entscheidung darüber anstand, welches Kühlmittel verwendet werden sollte, führte dies zu einer »erhebliche[n] Polarisierung im Kernforschungszentrum« (Marth 1992: 32) zwischen der Gruppe um den Kraftwerksingenieur Ludolf Ritz, deren Mitglieder hauptsächlich dem Maschinenbau entstammten, und den Kernphysikern um Wolf Häfele. Auch die Industrie war in dieser Frage gespalten und teilte sich wie das Karlsruher Zentrum in zwei konkurrierende Lager auf. Während das Firmenkonsortium AEG/GHH/MAN den Dampfbrüter favorisierte, setzten Siemens und Interatom auf Natrium als Kühlmittel für den Schnellen Brüter.

In dem Streit um die beiden Kühlmittelvarianten führten die Ingenieure vor allem das Argument ins Feld, daß es sich bei der Kühlung mit Wasserdampf um eine relativ kostengünstige Technik handelte, die nicht nur im konventionellen Kraftwerksbau seit langem erprobt war, sondern sich auch im Fall des Leichtwasserreaktors bewährte. Deshalb werde, so die Gruppe um Ludolf Ritz, ein Dampfbrüter auch bei den späteren Betreibern des Kraftwerks auf eine höhere Akzeptanz stoßen, als die dort völlig unbekannte Natriumtechnik. Der erheblich größere Wasserdruck, dem der Kühlkreislauf eines Schnellen Brüters aufgrund der extremen Leistungsdichte seines Kerns im Vergleich zum Leichtwasserreaktor standhalten mußte, war in den Augen dieser Gruppe kein unüberwindliches Problem. Dem hielten die Physiker, die von Beginn an Natrium den Vorzug gaben, entgegen, daß die Befürworter des Dampfbrüters den Beweis dafür schuldig blieben, mit ihrem Konzept einen negativen Void-Koeffizienten des Reaktorkerns garantieren und zugleich eine Brutrate »größer eins« erzielen zu können, während beides im Fall der Natriumkühlung gewährleistet war. Im BMwF führte dieser Konflikt zwischen der sogenannten »Dampfbrüterfraktion« und den Anhängern des Natriumbrüters zu einer starken Verunsicherung und lähmte zeitweise dessen Handlungsfähigkeit. Angesichts der »heftigen, teils emotionsgeladenen« (Marth 1992: 30) Debatte sah sich das Bonner Ministerium nahezu drei Jahre lang außer Stande, eine Entscheidung für oder wider eine der streitenden Parteien zu fällen.

Gegen Ende der sechziger Jahre jedoch gerieten die Verfechter des Dampfbrüters durch eine Reihe von Rückschlägen dann tatsächlich zunehmend in Beweisnot, was die reaktorphysikalischen Eigenschaften eines solchen Kraftwerks anging (Keck 1984: 166–171). Die AEG mußte 1967 ihre Versuche einstellen, einen Heißdampfreaktor zu Versuchszwecken zu einem Dampfbrüter umzubauen, da sich dessen Void-Koeffizient nicht auf ein ausreichendes Maß absenken ließ (ebd.: 168). Die Versuche mit dem experi-

mentellen Dampfbrüter EBR II in den USA verliefen ähnlich enttäuschend, da auch das dort gewählte Design nicht in verlässlicher Weise zu einem negativen Void-Koeffizienten führte (Marth 1992: 34). Obwohl damit nun keineswegs definitiv widerlegt war, daß sich ein mit Dampf gekühlter Brüter reaktorphysikalisch prinzipiell realisieren ließ, lieferten die Erfahrungen mit diesen beiden experimentellen Reaktoren dem BMwF jedoch gute Gründe, sich gewissermaßen auf die »sichere Seite« zu schlagen und dem Natriumbrüter den Vorzug zu geben (Interview XXXVII).

Hinzu trat, daß der amerikanische Konzern General Electric 1968 die Entwicklung seines Experimental Steam Cooled Reactor (ESCR) aufgrund technischer Schwierigkeiten aufgab (Marth 1992: 34). Dies bestätigte abermals die Zweifel an der Machbarkeit des Dampfbrüters, lieferte neben den physikalischen und technischen Problemen, die dessen Entwicklung aufwarf, dem BMwF aber auch einen weiteren Grund, dieses Projekt einzustellen. Die Bundesrepublik hätte sich mit der Entwicklung einer eigenen Dampfbrüterlinie nicht nur auf ungesichertes wissenschaftlich-technisches Terrain begeben, sondern auch international isoliert und der Möglichkeit beraubt, auf dem Gebiet der Brütertechnologie mit anderen Ländern zu kooperieren. Neben den USA entschieden sich am Ende der sechziger Jahre auch die UdSSR, Großbritannien, Frankreich, Italien und Japan und damit alle Länder, die an der Entwicklung dieser Technologie arbeiteten, für den Natriumbrüter (ebd.: 34), der sich damit nun weltweit als einzige Alternative unter den Plutoniumbrütern durchsetzte.

Angesichts dieser Entwicklung zog das BMwF 1969 die Entscheidung in dem Streit um die beiden Brütervarianten an sich und beendete die Debatte innerhalb des Karlsruher Forschungszentrums und der Industrie, indem es die Dampfbrüterlinie aufgab, das entsprechende Projekt auslaufen ließ und damit den Weg für den Bau des SNR-300 frei machte. Den entsprechenden Bauauftrag erteilte die 1969 gegründete Projektgesellschaft Schneller Brüter, der federführend das deutsche Energieversorgungsunternehmen RWE, dessen belgischer Partner Synatom und ein niederländische Energieversorger angehörten. Erteilt wurde dieser Auftrag wiederum an ein Herstellerkonsortium, das sich bereits 1968 konstituiert hatte und auf deutscher Seite aus den Firmen Siemens und Interatom sowie auf der belgischen und niederländischen Seite aus den Unternehmen Belonucléaire beziehungsweise Neratom zusammensetzte (Keck 1884: 188–195).

Gewissermaßen im Fahrwasser des Erfolgskurses, den das Kernforschungszentrum Karlsruhe mit dem Projekt Schneller Brüter seit 1963 nahm, stieg auch die Kernforschungsanlage Jülich mit dem Thorium-Hoch-

temperaturreaktor (THTR) zu einer Großforschungseinrichtung des Bundes auf. Mit der Gründung dieser Einrichtung und dem Bau und Betrieb der beiden britischen Reaktoren MERLIN und DIDO hatte sich das Land Nordrhein-Westfalen finanziell gründlich überlastet. Die Kernforschungsanlage Jülich war eine typische »Brandstiftung« und eine der zahlreichen Forschungsorganisationen, die der Ministerialdirektor im Landesamt für Forschung, Leo Brandt, ins Leben gerufen hatte. Brandt war ein »dynamischer Promotor« (Müller 1990: 283) der nordrhein-westfälischen Forschungspolitik und in den fünfziger Jahren eine der führenden Figuren auf diesem Feld.

Allerdings überwogen die im Zuge seines forschungspolitischen Engagements entstehenden finanziellen Verpflichtungen häufig die haushaltspolitischen Möglichkeiten der nordrhein-westfälischen Kultuspolitik, und die Förderung der auf seine Initiative zurückgehenden Forschungseinrichtungen war meist bereits wenige Jahre nach deren Gründung gefährdet.⁵² Dies galt auch und in besonderem Maße für die Kernforschungsanlage Jülich, deren Existenz das Land schon seit den frühen sechziger Jahren durch größere finanzielle Zuschüsse des Bundes zu sichern suchte. Mitte der sechziger Jahre gelang es dann dem Land Nordrhein-Westfalen, den Bund durch das Angebot an der Finanzierung der Kernforschungsanlage in Jülich zu beteiligen und den Karlsruher Plutoniumbrüter SNR-300 um den Thoriumbrüter THTR-300 zu ergänzen, mit dem sich das Energiepotential der Kernspaltung vollends ausschöpfen ließ.

Der in Jülich entwickelte THTR war ursprünglich weder von der Kernforschungsanlage selbst, noch als Brutreaktor konzipiert worden. Das Grundkonzept für dieses zunächst als HTR bezeichnete Kraftwerk ging auf den Abteilungsleiter Reaktorentwicklung der Firma Brown, Boveri & Cie (BBC), Rudolf Schulten zurück, der sich anfänglich zum Ziel gesetzt hatte, einen besonders effizienten und sicheren Leistungsreaktor zu entwerfen. Schulten gehörte vor seiner Tätigkeit für die BBC der Arbeitsgruppe Neutronenphysik und Reaktorkonstruktion um Karl Wirtz am Göttinger Max-Planck-Institut für Physik an, war aber von dem Konzept des Schwerwasserreaktors, das Wirtz verfolgte, nicht überzeugt (Interview XXXIV).

52 So entstanden auf die Initiative von Leo Brandt hin allein zwischen 1950 und 1954 achtzehn Institute, darunter auch die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) oder das Institut für Instrumentelle Mathematik (IIM) als Vorläufer der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD), die zumeist später vom Bund übernommen wurden (Wiegand 1994: 29).

Nach Studienaufenthalten in Großbritannien und den USA, bei denen er sich mit den Gas-Graphit moderierten Reaktoren vom britischen Typ Calder-Hall und den Plänen des amerikanischen Unternehmens General Atomic für den Bau eines Reaktors, der die vergleichsweise hohen Gasaustrittstemperaturen konventioneller Kraftwerke erreichte, vertraut gemacht hatte, entwarf Schulten 1956 ein eigenes Konzept für einen Hochtemperatur- oder auch Kugelhaufenreaktor, für das er die BBC gewinnen konnte. Die BBC hatte bis zu diesem Zeitpunkt zusammen mit den Stadtwerken Düsseldorf und einer Reihe weiterer kleinerer und lokaler Versorgungsunternehmen, die sich von dem mächtigen Stromproduzenten RWE unabhängig zu machen suchten, den Nachbau eines Calder-Hall-Reaktors ins Auge gefaßt. Das Unternehmen nahm jedoch angesichts der Vorzüge, die der HTR versprach, von diesem Vorhaben Abstand und gewann seinerseits für den Entwurf von Schulten insgesamt neun Stadt- und Elektrizitätswerke, die sich zur Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR) zusammenschlossen.⁵³ Auch die Firma Krupp schloß sich der BBC an und bildete mit ihr 1957 eine Arbeitsgemeinschaft aus der 1961 die Firma Brown Boveri/Krupp Reaktorbau (BBK) hervorging (Kirchner 1991: 49–51).

Für die BBK und die lokalen Versorgungsunternehmen war der Hochtemperaturreaktor vor allem deshalb von Interesse, weil sich dieser Reaktortyp nicht nur für die Stromerzeugung eignete, sondern darüber hinaus auch Prozeßwärme lieferte, die in der chemischen Industrie und zur Veredelung und Vergasung insbesondere von Braunkohle eingesetzt werden konnte. Weiterhin versprach der HTR eine besonders hohe Wirtschaftlichkeit, da er mit kugelförmigen Brennelementen betrieben werden sollte, die es erlaubten, das Spaltmaterial während seines Betriebs auszutauschen und es überflüssig machten, den Reaktor während dieser Phase stillzulegen. Außerdem ließen sich mit Hilfe der kugelförmigen Brennelemente auch die Betriebsrisiken des Reaktors minimieren und die Gefahr einer Kernschmelze verringern, da dessen Kern nicht wie im Falle aller anderen Reaktortypen wie ein »Meiler« funktionierte, der mit Brennstoff bevorratet werden mußte, sondern wie ein »Ofen«, der immer nur mit der aktuell benötigten Menge an Spaltmaterial bestückt werden konnte (Interview XXXIV; Radkau 1983: 296, Anhang 28a).

Die Möglichkeit, den Hochtemperaturreaktor nicht nur für die Stromerzeugung einzusetzen, sondern auch im industriellen Maßstab dessen Prozeß-

53 Dies waren die Stadtwerke Bonn, Bremen, Duisburg, Düsseldorf, Kiel und Wuppertal sowie die Elektrizitätswerke Hagen, Hameln und Herford (Kirchner 1991: 52–53).

wärme nutzen zu können, brachte dem Entwurf von Schulten auch in der nordrhein-westfälischen Landesregierung viele Anhänger ein. »Nordrhein-westfälische Politiker waren von diesem Anwendungsgebiet des HTR fasziniert und fanden lobende Worte für diese Idee« (Kirchner 1991: 71). Die Option, die Prozeßwärme des Reaktors zu nutzen, ließ es potentiell zu, die Konkurrenz zwischen der konventionellen und nuklearen Energieerzeugung zu überwinden und in einen komplementären »Verbund von Kohle und Kernenergie« (ebd.: 71) zu überführen, der die Zukunft der Kohlereviere im Rhein-Ruhr-Gebiet sicherte. Ende der fünfziger Jahre schien es deshalb zeitweise so, daß der große Konsens, von dem der HTR im Kreis der Hersteller und Betreiber sowie auf der landespolitischen Ebene getragen wurde, zumindest in NRW rasch zum Einstieg in die Kernenergie und zum »Ausbau einer Kette von Kernkraftwerken entlang einer Energietrasse im Dreieck Köln, Emmerich, Hamm und der Anbindung von Großabnehmern von Prozeßwärme«⁵⁴ führen werde.

Doch obwohl die nordrhein-westfälische Landesregierung großes Interesse am HTR besaß, sah sie sich angesichts der Kosten, die der Bau und Betrieb von MERLIN und DIDO verursachten, außer Stande, weitere Fördermittel für einen dritten Versuchsreaktor aufzubringen. Ihr Beitrag zur Finanzierung seiner Entwicklung beschränkte sich daher darauf, den Versorgungsunternehmen auf dem Gelände der Kernforschungsanlage Jülich unentgeltlich Baugelände zu überlassen. Auch der Bund beteiligte sich zunächst nicht an der Finanzierung eines Versuchsreaktors für den HTR. Die Deutsche Atomkommission hatte diesen Reaktortyp im »Eltviller-Programm« von 1957 noch gar nicht berücksichtigen können und dann erst 1958 neben einer Reihe weiterer Typen in ihr revidiertes Memorandum aufgenommen. Dies führte dazu, daß der Bund erst einen Teil der Kosten für die Entwicklung des HTR übernahm, nachdem die BBC und Krupp im Auftrag der AVR mit den Vorbereitungen für den Bau eines gleichnamigen Reaktors auf dem Gelände des Forschungszentrums in Jülich begonnen hatten, das Projekt aber an der mangelnden Finanzkraft der Stadt- und Elektrizitätswerke zu scheitern und deren Bündnis auseinanderzurechen drohte. Ende der fünfziger Jahre formierte sich dann dieses Bündnis neu, da sich einige der lokalen Versorgungsunternehmen aus dem Projekt zurückzogen und andere hinzutraten. Dies verzögerte den Bau des Versuchsreaktors in Jülich bis 1961 und hatte

54 So das Kernenergieprogramm der CDU-Landtagsopposition, das genauso gut der Feder des SPD-Experten für Wissenschafts- und Forschungspolitik, Leo Brandt, hätte entstammen können (Kirchner 1991: 72).

zur Folge, daß die Entwicklung des HTR nun genau parallel zum einsetzenden Siegeszug der Leichtwasserlinie verlief. Als der Versuchsreaktor für den HTR dann 1964 fertiggestellt war, hatten die Hersteller und Betreiber angesichts des Siegeszugs des anderen Reaktortyps ihr Interesse am HTR bereits verloren. Das Kooperationsprojekt zwischen der BBK und den lokalen Stromversorgern brach jetzt tatsächlich auseinander und die Kernforschungsanlage Jülich stand vor einer ähnlichen Situation wie kurze Zeit zuvor das Forschungszentrum in Karlsruhe mit dem Schwerwasserreaktor. Wie im Fall der Karlsruher Einrichtung gelang es aber auch dem Zentrum in Jülich, seine drohende Schließung abzuwenden, indem es sich der Brütertechnologie zuwandte und sich die verbleibende zweite Option auf diesem Gebiet zueigen machte.⁵⁵

Der HTR war zwar in der Konkurrenz mit dem Leichtwasserreaktor unterlegen, eignete sich, wenn der Reaktorkern entsprechend modifiziert wurde, gleichwohl auch als thermischer Thoriumbrüter. Ursprünglich als »Gegenwartsreaktor« der ersten Generation gedacht, ließ sich der HTR damit zu einem »Zukunftsreaktor« der zweiten Generation neben dem Schnellen Brüter weiterentwickeln und als THTR erneut ins Spiel bringen. Genaugenommen war der THTR zwar kein veritabler Brutreaktor, sondern ein Konverter, da im Thorium-Uran Zyklus nur eine Brutrate knapp »unter eins« zu erzielen war, stellte damit aber unter dem Gesichtspunkt einer möglichst effizienten Nutzung des Kernenergiepotentials nach dem Karlsruher Plutoniumbrüter immer noch die zweitbeste Lösung dar.

Dem Bund bot sich mit der Entwicklung dieses Reaktors die Chance, sein Brüterprogramm, wie dies jetzt auch offiziell hieß, zu »ergänzen« und zugleich seine Hausmacht mit einer weiteren kerntechnischen Forschungseinrichtung auszudehnen. Technisch gab es immerhin zwei weitere Alternativen zum THTR, die jedoch in der Bundesrepublik nie ernsthaft in Betracht gezogen wurden. Prinzipiell hätten sich neben dem Reaktor von Schulten auch der Salzschnmelzen- und der Schwerwasserreaktor als Thoriumbrüter geeignet, und für Brutzwecke wies die Salzschnmelzentechnik sogar leichte Vorteile gegenüber dem THTR auf. Aber diese beiden Konkurrenten des Schulten-Reaktors lieferten keine Prozeßwärme, die den THTR über die gleichzeitige Erzeugung von Strom und Brennstoff hinaus zur attraktivsten Alternative machte (Kirchner 1991: 62–66).

55 Vgl. Kirchner 1991: (52–55, 62–66). Im Bundesforschungsministerium sah man dies spiegelbildlich: »Wir haben die beiden Möglichkeiten des Brütens auf die Domänen von Karlsruhe und Jülich aufgeteilt« (Interview XXVI).

Der Projektantrag für den Bau des THTR-300, den Rudolf Schulten, der während der Entwicklung des AVR die BBC verlassen hatte und zum Direktor des Instituts für Reaktorphysik und Reaktorkonstruktion in Jülich berufen worden war, 1965 an das Bonner Forschungsministerium stellte, traf somit dort auf ähnlich großes »Wohlwollen« wie zuvor der Karlsruher Antrag. Mit diesem Projekt stieg jetzt auch die Kernforschungsanlage Jülich zu einer Großforschungseinrichtung des Bundes auf, die weniger noch als das Karlsruher Zentrum von intra- oder interorganisatorischen Konflikten erschüttert wurde. Die Entwicklungs- und Transferaktivitäten für den Bau des THTR liefen nahezu reibungslos ab. So wie sich der SNR-300 zur zentralen und zentrierenden Aufgabe des Karlsruher Forschungszentrums entwickelte, fungierte auch der THTR-300 lange Zeit als die bestimmende und identitätsbildende Aufgabe der Kernforschungsanlage Jülich (Interview XXXIV).

Soweit es die reaktorphysikalischen Probleme anging, die bei der Weiterentwicklung des HTR zum THTR zu lösen waren, lag auch dies in den Händen der Physiker und hier vor allem bei Rudolf Schulten und seinem Institut für Reaktorphysik und Reaktorkonstruktion. Die Koordination des Gesamtprojekts übernahm wie in Karlsruhe ein Projektkomitee, das sich unter dem Vorsitz des BMwF aus Vertretern der Wissenschaft und der beteiligten Industrie zusammensetzte. Im Unterschied zu Karlsruhe, wo sich unter der Leitung des Projekts und später des Projektkomitees Schneller Brüter eine straffe hierarchische Matrixorganisation herausbildete, basierte der Forschungs- und Transferprozeß im Fall des THTR in starkem Maße auf einer horizontalen Selbstkoordination der eher lose gekoppelten Institute des Jülicher Zentrums. Die forschungspolitische Steuerung durch das BMwF bediente sich hier weniger hierarchischer Mittel, sondern koordinierte die Aktivitäten der Institute und Unternehmen vielmehr durch Forschungsaufträge und Verträge. Rudolf Schulten zufolge bedurfte es auch gar keiner straffen hierarchischen Steuerung des Projekts, da »jeder wußte, was wann wie zu tun war. Das lief ohne große Interventionen von unserer Seite aus ab. In Karlsruhe hat ein strenges Regiment geherrscht, aber wir haben die Zügel locker geführt« (Interview XXXIV). Die Rolle des REW im Fall des Schnellen Brüter nahmen beim THTR die Vereinigten Elektrizitätswerke (VEW), die das Kraftwerk offiziell in Auftrag gaben und später betreiben sollten.

Auch die Konflikte zwischen den beiden Großforschungseinrichtungen in Karlsruhe und Jülich hielten sich in Grenzen. Für das Karlsruher Zentrum war Jülich zwar der »große Konkurrent« (Interview XXXV), und vor allem Häfele machte keinen Hehl daraus, daß er neben dem Leichtwasserreaktor und dem Schnellen Brüter keinen Bedarf für einen dritten Reaktortyp sah.

Dennoch glichen die Beziehungen zwischen den Kontrahenten eher einem »sportlichen Wettbewerb« (Interview XXXV)⁵⁶, der letztlich sogar die Effizienz der Projekte gesteigert haben dürfte. Beide Einrichtungen arbeiteten mit der Entwicklung des SNR-300 und THTR-300 an klar abgegrenzten Aufgaben, die sich kaum überlappten, und waren darauf bedacht, diese Aufgaben angesichts der Konkurrenzsituation, in der sie gegenüber dem Bonner Forschungsministerium standen, zügig und verlässlich zu erfüllen. Vor allem Karlsruhe glänzte mit einer geradezu »perfekten Projektorganisation«, wie selbst spätere Dissidenten einräumten, die dem Forschungszentrum den Rücken kehrten und sich der Anti-AKW-Bewegung anschlossen (Interview XXXVII).

Als Folge ihres Aufstiegs zu den führenden kerntechnischen Einrichtungen in der Bundesrepublik lösten die Großforschungszentren in Karlsruhe und Jülich auch die Deutsche Atomkommission in ihrer Funktion als wissenschaftliches Beratungsgremium der Bundesregierung faktisch ab. Die Kommission wurde zwar erst 1976 offiziell aufgelöst, besaß aber bereits in der zweiten Hälfte der sechziger Jahre keine wichtigen Aufgaben mehr und zog sich selbst sukzessive aus der Atompolitik des Bundes zurück. Parallel dazu übernahmen die beiden Kernforschungszentren mit dem Auslaufen der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung mehr und mehr den wissenschaftlichen Part in der sicherheitstechnischen Regulierung der atomaren Anlagen in der Bundesrepublik.

Unter der atompolitischen Aufsicht des BMwF, dann des BMBW und später des BMFT bildete sich im Verlauf der zweiten Hälfte der sechziger Jahre in der sicherheitstechnischen Regulierung in der Bundesrepublik ein komplexes, korporatives »Transaktions- und Verhandlungsnetzwerk« (Czada 1993: 79) heraus. Dieses Netzwerk bestand aus Bundesbehörden und Landesinstitutionen, Standardisierungsorganisationen wie dem Deutschen Institut für Normung (DIN), Kraftwerksherstellern, Betreibern, privaten technischen Überwachungsvereinen (TÜV), Versicherungen, Berufsgenossenschaften und den Großforschungseinrichtungen in Karlsruhe und Jülich, die allesamt zen-

56 Wobei sich Jülich stets in der Rolle des »kleinen Bruders von Karlsruhe« (Interview XXXIV) sah. Die Forschungseinrichtung in Jülich besaß auch nicht den »missionarischen Eifer« (Interview XXXIV), den das Projekt Schneller Brüter entwickelte und mit seinem Erfolgskurs auf das gesamte Karlsruher Zentrum übertrug. In Jülich ging man davon aus, daß der THTR auf absehbare Zeit im Schatten des Schnellen Brüters stehen und mit seinem Thorium-Uran Zyklus kaum je die energiepolitische Bedeutung des Uran-Plutonium Zyklus erlangen würde.

trale Funktionen in der wissenschaftlichen Beratung, Begutachtung und bei der Erstellung von konkreten technischen Regelwerken übernahmen.

In den zum Teil hoch formalisierten Verhandlungsprozessen der Komitees und interorganisatorischen Gremien dieses Regulierungsnetzwerks von staatlichen, parastaatlichen und privatrechtlichen Akteuren sind die »wichtigsten Entscheidungen an den ›Stand von Wissenschaft und Technik‹« (Czada 1993: 77) gebunden und werden durch den Kerntechnischen Ausschuß der Bundesregierung in verbindliche Verordnungen umgesetzt. Dies räumte den Zentren in Karlsruhe und Jülich großen Einfluß auf die Sicherheitsstandards der kerntechnischen Anlagen in der Bundesrepublik ein, die in der Tat weltweit zu den strengsten Normen zählen (Czada 1992, 1993).

Im Zuge dieser Entwicklung dehnte insbesondere das Zentrum in Karlsruhe seine reaktorphysikalischen Studien auch auf die Leichtwasserlinie aus, für die es eine Reihe von aktiven und passiven Sicherheitsmaßnahmen entwickelte.⁵⁷ Beide Zentren übernahmen auch die Ausbildung und Qualifizierung der sogenannten »Kernkraftwerksfahrer« und »Kernkraftwerksmeister« (Rusinek 1996: 330–332).

In der zweiten Hälfte der siebziger Jahre stellte sich schließlich die von der Bundesregierung schon seit den frühen sechziger Jahren angestrebte Kooperation mit anderen europäischen Ländern und insbesondere mit Frankreich auf dem Gebiet der atomaren Kraftwerks-, Brut- und Sicherheitstechnologie ein. Die Koordination der nationalen kerntechnischen Forschungs- und Entwicklungsprogramme auf der europäischen Ebene war lange Zeit an der ablehnenden Haltung Frankreichs gescheitert, nahm allerdings in den siebziger Jahren in dem Maße Konturen an, wie sich die Bundesrepublik zu einem Kooperationspartner entwickelte, dessen Know-how für andere Länder attraktiv wurde. Die deutsche Energiewirtschaft verfügte Ende der siebziger Jahre über einen internationalen Spitzenplatz auf dem Gebiet der Kerntechnik und war »neben der amerikanischen und sowjetischen die ein-

57 So einfach der Leichtwasserreaktor im Vergleich zu anderen Reaktortypen aufgebaut ist, so kompliziert wird seine Neutronenphysik, wenn er die Auslastungsgrenze erreicht. Der Leichtwasserreaktor ist nicht inhärent sicher und neigt unter Vollast zu unkontrollierten Leistungsexkursionen. Die Anlagen müssen deshalb, wie es technisch heißt, stets »übermoderiert gefahren werden« und machen insbesondere aktive Schutzmaßnahmen wie den Einbau von Absorberstäben für die Notfallabschaltung erforderlich. Solche aktiven Maßnahmen führen aber nicht per se zu einer höheren Sicherheit, sondern können sich wiederum nachteilig auf die reaktorphysikalischen Eigenschaften der Anlagen auswirken und müssen in ihren Auswirkungen auf den Reaktorkern sorgfältig untersucht werden (zu den reaktorphysikalischen Problemen der Leichtwasserreaktoren vgl. Michaelis [Hrsg.] 1986: 94–105).

zige, die alle mit der Kernkraftnutzung verbundenen Technologien beherrschte und aufgrund ihrer industriellen Kapazität auch weltweit anbieten konnte« (Czada 1992: 136). Dazu zählten natürlich vor allem der SNR-300 und der THTR-300 als die »Flaggschiffe« der bundesdeutschen Nukleartechnologie.

Angesichts des Erfolgskurses, auf den die bundesdeutsche Atompolitik und Atomwirtschaft in den sechziger und siebziger Jahren geriet, wurde die strategische Allianz zwischen der Forschung, Politik und Industrie zu keiner Zeit durch endogene Konflikte gefährdet. Auf seiten der Wissenschaft lieferte die Arbeit der beiden Kernforschungszentren vielmehr die Basis dafür, daß sich in der Bundesrepublik ein stabiles und alle relevanten atompolitischen Akteure umfassendes »belief system« etablieren konnte, das keinen Zweifel daran aufkommen ließ, mit der Brütertechnologie den richtigen Weg eingeschlagen zu haben. Ihre technologischen Erfolge machten die »nuclear community« in der Bundesrepublik allerdings auch unsensibel gegenüber Veränderungen auf den internationalen Energiemärkten, auf denen die Preise für nukleares Spaltmaterial infolge der bis heute etwa um den Faktor Zehn gestiegenen natürlichen Uranvorkommen ständig fielen. Mit den steigenden natürlichen Uranvorkommen und den fallenden Preisen für nukleares Brennmaterial sank die Konkurrenzfähigkeit der Brutkraftwerke gegenüber dem Leichtwasserreaktor und verschob sich deren Wirtschaftlichkeit in eine ungewisse Zukunft. Anders als etwa in den USA, wo die Förderung der Brütertechnologie Mitte der siebziger Jahre auslief, hatte dies in der Bundesrepublik aber keine unmittelbaren Konsequenzen für die Projekte in Karlsruhe und Jülich (vgl. Michaelis 1986: 113–114).

Wenn diese beiden Projekte letztlich trotzdem scheiterten und der SNR-300 beziehungsweise THTR-300 zwar fertiggestellt, doch nie oder nur für kurze Zeit in Betrieb gingen, so war dies nicht auf interne Meinungsverschiedenheiten und Auseinandersetzungen innerhalb der »nuclear community«, sondern auf externe Widerstände und den gesellschaftspolitischen Konflikt zurückzuführen, der sich in der Mitte der siebziger Jahre um die Atompolitik in der Bundesrepublik entzündete. Mit diesem Konflikt zerbrach der hier lange Zeit stabile energiepolitische Konsens und mit ihm insbesondere die zuvor kollektiv geteilte Überzeugung von den Vorteilen der Brütertechnologie. Die Anti-AKW-Bewegung stellte die Strategie der nuklearen Stromerzeugung zwar grundsätzlich in Frage, richtete sich aber speziell und besonders vehement gegen den von ihr befürchteten großindustriellen Einstieg in die Plutoniumerzeugung und damit primär gegen den Bau

des SNR-300 in Kalkar, der lediglich noch in den vornuklearen Betrieb ging und 1991 endgültig stillgelegt wurde.⁵⁸

Den THTR-300 nahm die Anti-AKW-Bewegung dagegen von ihrer Kritik vollkommen aus, um sich, wie Kirchner annimmt, angesichts der hohen inhärenten Sicherheit dieser Anlage nicht in eine reaktorphysikalisch-technische Detaildiskussion zu verstricken. »Die Kritiker der Kernenergie scheuten vielleicht deshalb eine Auseinandersetzung mit diesem Reaktorsystem« (Kirchner 1991: 28). Die Kernkraftgegner verfolgten generell nur kurze Zeit den Versuch, ihre Ziele mit physikalisch-technischen Argumenten zu untermauern und zogen sich dann auf eine grundsätzliche Kritik der nuklearen Stromerzeugung zurück, da die Gefahr bestand, daß sich die Bewegung im Zuge einer wissenschaftlichen Diskussion von ihren Kontrahenten »die Themen vorschreiben ließ« (Radkau 1983: 461).

Im dem Maße, wie sich damit die Diskussion von eng umrissenen reaktorphysikalischen Fragestellungen auf allgemeine Risiken der Kernenergie ausdehnte, bildete sich jetzt aber auch innerhalb der »nuclear community« Dissens heraus. Um die Mitte der siebziger Jahre entstand in Karlsruhe, Jülich und anderen kernphysikalischen Forschungseinrichtungen eine Fülle von Risikostudien, die mit unterschiedlichen Konzepten unterschiedliche Sicherheitsaspekte der Kerntechnik beleuchteten und zu unterschiedlichen Einschätzungen gelangten. Hatte die Forschungspolitik diese Studien in Auftrag gegeben, weil sie sich zunächst eine wissenschaftliche Klärung der Sicherheitsproblematik erhoffte, so wurde deutlich, daß sich die Vielfalt der durch die Anti-AKW-Bewegung aufgeworfenen Fragen seriösen wissenschaftlichen Antworten entzog. »Selbst bei den Expertendiskussionen läßt sich erkennen ... wie die Erörterung der Sicherheitsproblematik zusehends ins Uferlose geriet« (ebd.: 461).

Bei der Debatte über die Sicherheit kerntechnischer Anlagen rückten immer mehr Themen in den Vordergrund, die die Kompetenz der Experten offensichtlich überschritten: das Sabotage-Risiko; das Problem der Proliferation von Spaltstoff zur Waffenherstellung; die Bedeutung menschlicher Unzulänglichkeit bei der Auslösung von Störfällen. (ebd.: 460)

58 Auf der europäischen Ebene wird in dem Kooperationsprojekt »European Fast Reactor«, mit dem sich die Bundesrepublik eine Option für den Wiedereinstieg in die Brütertechnologie offenhält, allerdings an der Weiterentwicklung dieses Reaktortyps gearbeitet, der viele konstruktive Merkmale mit dem französischen Schnellbrüter »Super-Phénix« teilt (Marth 1992: 113).

Für die Beurteilung dieser Risiken gab es keine sicheren wissenschaftlichen Entscheidungsgrundlagen.

Im Zuge dieser Entwicklung teilte auch der THTR das Schicksal des SNR-300 und wurde mit dem zerschlagenden energiepolitischen Konsens über die Notwendigkeit des Baus von Brutreaktoren nun gewissermaßen das Opfer seiner eigenen Vielseitigkeit. In dem Maße, wie das Ziel, den THTR als Brutreaktor auszulegen, seine instruktive Kraft verlor, stellte sich sowohl in der Forschungspolitik als auch in der beteiligten Industrie angesichts der vielfältigen Richtungen, in die sich dieser Reaktor weiterentwickeln und optimieren ließ, Unsicherheit über seine physikalischen und technischen Spezifikationen ein.⁵⁹ War die Koordination des Projekts durch das Bonner Forschungsministerium und die Kooperation zwischen dem Jülicher Zentrum, den Herstellern und den Betreibern so gut wie reibungslos verlaufen, solange die Identität des THTR als Brutreaktor eindeutig festlag, so galt jetzt:

Die abweichenden Vorstellungen zwischen den Beteiligten aus Industrie, Forschung und Staat sowie die Einflußnahme konkurrierender Unternehmen verhinderten, daß sich aufgrund technischer Faktoren industrielle Allianzen und Experten->Communities< herausbilden konnten, welche die Entwicklung zielstrebig hätten vorantreiben können. (Kirchner 1991: 195)

Die Entscheidung, den THTR stillzulegen, war damit letztlich überdeterminiert. Nachdem der Schulten-Reaktor nicht mehr als Brüter dienen sollte, aber auch als Alternative für den Leichtwasserreaktor definitiv nicht mehr in Betracht kam, und die Hersteller- und Betreiberkonsortien über ihre Zielkonflikte das Interesse an diesem Reaktortyp verloren und sich aufzulösen begannen, stellte das BMFT angesichts der wachsenden Kosten, die im Zuge dieser Entwicklung auf das Ministerium zukamen, und des allgemeinen energiepolitischen Klimas, das am Ende der achtziger Jahre herrschte, die Förderung dieses Projekts 1989 ein.⁶⁰

59 Dies galt auch für Rudolf Schulten selbst, der es jetzt als Fehler betrachtete, den HTR zum THTR weiterzuentwickeln. In seinen Augen hätte sich der HTR angesichts seiner technischen Überlegenheit möglicherweise doch noch als ernsthafter Konkurrent der Leichtwasserlinie erweisen können, wenn das System nicht als Brutreaktor ausgelegt und zu einem früheren Zeitpunkt zur Marktreife gebracht worden wäre (Interview XXXIV).

60 Der Kernenergiekonflikt ist trotz aller immer noch spektakulären Aktionen der Atomkraftgegner heute weitgehend befriedet, ohne daß freilich ein neuer energiepolitischer Konsens erreicht worden wäre. Er hat sich mehr und mehr auf die Ebene der wissenschaftlichen und administrativen Regulierung verlagert, in die mittlerweile auch die »Expertenelite« (Radkau 1983: 416) der Kernkraftgegner kooptiert wurde und in der erneut ein eher sachlich-kooperativer Verhandlungsstil vorherrscht (Czada 1993).

Mit dem Abbruch der Brüterprojekte in Karlsruhe und Jülich entwickelten sich die ersten Großforschungsvorhaben des Bundes zwar energiepolitisch letztlich zu einem Mißerfolg, forschungspolitisch konnten sie jedoch durchaus dazu ermutigen, am Modell der Großforschung festzuhalten. Dementsprechend hat die Bonner Regierung nach den positiven Erfahrungen mit der Organisation der Forschung in Karlsruhe und Jülich dieses Modell auch auf viele andere Forschungsfelder übertragen. Allerdings hat es sich nie wieder als so erfolgreich und effizient erwiesen wie im Falle dieser beiden Zentren. Keine der späteren Großforschungseinrichtungen hat ihre Aktivitäten so konsequent auf bestimmte Ziele bündeln können und je wieder über das Maß an Aufgabensicherheit verfügt wie die Forschungsorganisationen, die für sie Modell standen.

Der Krebsforschung fehlt es bis heute an einigenden Forschungszielen und theoretisch-methodischen Standards, die es erlaubt hätten, das Deutsche Krebsforschungszentrum an einer einheitlichen Problemstellung mit stabil definierten Forschungsaufgaben auszurichten. Die organisatorische Struktur dieser Großforschungseinrichtung ist hoch pluralistisch und zerfällt faktisch in »multiple Zentren« (Hohlfeld 1979: 277). Ähnliches gilt für die Biotechnik (Buchholz 1979), und auch die Großforschung auf dem Gebiet der Kernfusion büßte ihre einheitliche und hierarchische Organisationsstruktur großenteils ein, als die Plasmaphysik in den siebziger Jahren in theoretische und experimentelle Schwierigkeiten geriet und sich konkurrierende Reaktormodelle herausbildeten (Küppers 1979). Statt auf eine einheitliche Struktur der staatlichen Forschungsorganisation lief die Gründung weiterer Großforschungseinrichtungen durch den Bund auf eine Diversifizierung der Zentren hinaus, deren gemeinsame Identität sich schon sehr bald auf ihren rechtlichen Rahmen und ihren Finanzierungsmodus reduzierte (Hohn/Schimank 1990: 233–295). In besonderem Maße aber weicht die Großforschung im Fall der Informatik und Informationstechnik von den einstigen Vorbildern für das Modell der Großforschung in Karlsruhe und Jülich ab. Die Entstehung, Entwicklung und Funktionsweise dieses Forschungsfeldes und die Gründe für seine Abweichungen von diesem Modell werden die Themen der nun folgenden Kapitel sein.

Kapitel 4

Entdeckung des Computers

4.1 Wissenschaftssoziologische Konstruktionen und reale Konstrukte

Ähnlich wie im Fall der Nuklearphysik die Kernspaltung post hoc zu einem theoretisch vorausgesagten und erwarteten Phänomen stilisiert worden ist, gilt auch der Computer heute als theoretisch angeleitete und gezielte Entwicklung. Diese Auffassung findet sich in nahezu allen historischen Darstellungen seiner Entstehungsgeschichte, wird aber auch in der Wissenschaftssoziologie und hier insbesondere von Klaus Mainzer vertreten, der sich explizit am Kuhnschen Phasenmodell der wissenschaftlichen Entwicklung orientiert und sowohl die Entstehung des Computers als auch die der Informatik aus einer konsequent internalistischen Perspektive rekonstruiert.⁶¹ Aus dieser Perspektive erscheint der Computer als das Ergebnis eines traditionsreichen, interdisziplinären, mathematischen und ingenieurwissenschaftlichen »Forschungsprogramms« (Mainzer 1994: 4), das nicht ohne Rückschläge, jedoch in letztlich kumulativen Erkenntnisfortschritten und aufeinander aufbauenden theoretischen und technischen Modellen zur Konstruktion einer algorithmischen Universalmaschine führte.

Meist beginnen die Darstellungen zur Entstehungsgeschichte des Computers bereits mit dem antiken Abakus, um dann einen großen Bogen über das siebzehnte Jahrhundert und die mechanischen Rechenmaschinen von

61 Vgl. Mainzer (1979, 1994). Für die historischen Studien siehe etwa Goldstine (1972), Kaufmann (1974), Vorndran (1986). In ihrem Grundmuster laufen vor allem die historischen Darstellungen durchweg auf eine teleologische Interpretation der Entstehung des Computers ähnlich der von Ligonnière hinaus: »Die Erfindung des Computers stellt die Vollendung eines alten Traums dar, der – zunächst unbewußt – zwanzig Jahrhunderte lang reifte. ... An diesem Abenteuer war die ganze Menschheit beteiligt, von den ältesten Zivilisationen bis in unsere Zeit« (Ligonnière, zitiert nach Lévy 1994: 921).

Wilhelm Schickard, Blaise Pascal und Gottfried Wilhelm von Leibniz zur »analytical engine« als erstem programmierbarem Rechner zu schlagen, den Charles Babbage am Beginn des neunzehnten Jahrhunderts entworfen hat. Leibniz wird in diesem Zusammenhang zugeschrieben, mit seinem Programm zur Formalisierung der Logik zugleich das theoretische Konzept der Universalmaschine formuliert (Mainzer 1979: 131) und die »theoretischen Grundlagen des Computers entdeckt zu haben« (Vorndran 1986: 40), während Babbage mit seiner »analytical engine« die erste mathematische Universalmaschine entworfen und damit den modernen Computer bereits um 1830 vorweggenommen haben soll (vgl. etwa Hodges 1989: 343). Babbage sei aber an fertigungstechnischen Schwierigkeiten gescheitert und in Vergessenheit geraten, da seine Ideen ihrer Zeit zu weit voraus eilten.

Da es erst die Elektromechanik beziehungsweise Elektronik erlaubt habe, Babbages Vision technisch zu verwirklichen, wird der vermeintliche rote Faden in der Entstehungsgeschichte des Computers dann meist wieder bei den programmierbaren Rechnern aufgenommen, die von Konrad Zuse in Deutschland, George Stibitz, Howard H. Aiken und anderen in den USA am Ende der dreißiger, Anfang der vierziger Jahre dieses Jahrhunderts entwickelt wurden und die als unmittelbare Vorläufer des modernen Computers gelten. Die Entwicklung dieser Rechner habe sich eng an dem 1936 von Alan M. Turing entworfenen mathematischen Modell der algorithmischen Universalmaschine orientiert und den Durchbruch zum modernen Computer vorbereitet. »Beide Arbeitsansätze formulierten die technologischen und kognitiven Voraussetzungen der späteren computer science« (Mainzer 1979: 123).

Der endgültige Durchbruch sei dann wenige Jahre später dem Mathematiker John von Neumann vorbehalten gewesen, dem Turings theoretisches Modell als »Vorbild« (Mainzer 1994: 5) für den Entwurf von EDVAC (Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer) gedient habe.⁶² Von Neumann habe in seiner berühmten Schrift »First Draft of a Report on the EDVAC« von 1945 »in geradezu paradigmatischer Weise theoretische Konzepte des Maschinenbegriffs von Leibniz bis Turing aufgegriffen und einer ersten befriedigenden technischen Realisation zugeführt« (Mainzer 1979:

62 Von Neumann war einer der führenden und renommiertesten Mathematiker dieses Jahrhunderts und beschäftigte sich nicht nur mit ungewöhnlich vielen mathematischen Teilgebieten wie Logik, Geometrie, Numerik und Analysis, sondern darüber hinaus auch mit Fragen der Atomphysik und Ökonomie. Zusammen mit Oskar Morgenstern verfaßte er 1943 das Standardwerk »Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten« (Neumann/Morgenstern 1961).

132, 1994: 68). Ihm wird damit zugleich zugeschrieben, den »theoretischen Kern einer neuen Wissenschaft« geschaffen zu haben (Mainzer 1979: 132).

In der Tat bildet das logische Design von EDVAC mit wenigen Modifikationen die bis heute gültige Standardarchitektur des Computers. So wie es sich bei den Großrechnern der fünfziger und sechziger Jahre durchweg um sogenannte Von-Neumann-Maschinen handelte, sind auch die modernen Personal Computers im Prinzip nur miniaturisierte Versionen von EDVAC. Eine genauere Betrachtung der Entstehungsgeschichte des Computers macht jedoch deutlich, daß diese Maschine weder in der Mathematik und Logik noch in der Elektrotechnik gezielt konzipiert worden ist, sondern ähnlich wie das Phänomen der Kernspaltung eine unerwartete Entdeckung war. Der Computer ist damit auch nur in sehr indirekter Weise ein Produkt der amerikanischen Großforschungsprojekte während des Zweiten Weltkrieges, wie dies externalistische Erklärungsansätze annehmen.⁶³ Er ist zwar im Rahmen, aber nicht als Ziel, sondern als unentdecktes und unerwartetes Nebenprodukt dieser militärischen Projekte entwickelt worden.

Der Computer war keine »revolutionäre Einzelerfindung. ... Ein schnelles Rechenggerät funktionsfähig zu bekommen war das Ziel« (Zemanek 1991: 44). Seine Entstehung geht auf »bricolage« und rein experimentell-handwerkliche Versuche zurück, Handkurbelmaschinen zu automatisieren und zu programmierbaren Rechenmaschinen weiterzuentwickeln. Die Konstrukteure der ersten programmierbaren Maschinen verfolgten allein das praktische Motiv, das Rechnen als die »niedrigste aller Geistestätigkeiten«⁶⁴ zu rationalisieren, und sie strebten dabei weder eine Universalmaschine an, noch hatten sie Turings mathematisches Modell vor Augen. Turing hatte sein Modell auch nicht als Vorbild für konkrete Rechner entworfen. Es diente vielmehr rein grundlagentheoretischen, innermathematischen Beweis-zwecken und hätte sich technisch zudem nicht sinnvoll umsetzen lassen. Die Turingmaschine hat die Entwicklung des Computers nicht angeleitet, sondern ist nachträglich und erst dann aufgegriffen und zu seiner theoretischen Beschreibung herangezogen worden, als der Computer bereits entstanden war und sich herausstellte, daß sich dieses Modell logisch äquivalent zum Von-Neumann-Rechner verhielt. Diese Entdeckung hat dann auch erst wie-

63 Vgl. zu dieser These etwa Halfmann (1984), Noble (1984), Aspray (1990).

64 So Arthur Schopenhauer, der dies dadurch belegt sah, daß das Rechnen als einzige aller Geistestätigkeiten »durch eine Maschine ausgeführt werden kann; wie denn jetzt in England dergleichen Rechenmaschinen bequemiheitshalber schon in häufigem Gebrauch sind« (Arthur Schopenhauer: Parerga und Paralipomena Bd. 2, § 356).

der Turings Modell stabilisiert, das für mathematische Zwecke problematisch ist, da es mit intuitiven Begriffen arbeitet und sich seine Beweisziele nicht deduktiv ableiten lassen.

Daß der Computer keine gezielte und theoretisch angeleitete Entwicklung war, bedeutet freilich nicht auch, daß die Von-Neumann-Maschine eine rein sozial bestimmte Selektion war, wie dies in der sozialkonstruktivistischen Literatur und dort insbesondere von Heintz (1993a) in Anlehnung an die Theorie der Technikgenese von Pinch und Bijker (1987) behauptet wird. Heintz zufolge wurde die Von-Neumann-Architektur ausschließlich aufgrund der wissenschaftlichen Reputation dieses Mathematikers den Konstruktionen von Zuse, Stibitz oder Aiken vorgezogen und aus »einem ganzen Bündel gleichwertiger Lösungen« als Standarddesign des modernen Computers selegiert (Heintz 1993a: 228).⁶⁵

Tatsächlich aber ging die Selektion dieser Architektur nicht auf einen kontingenten sozialen Definitionsprozeß zurück. Die Von-Neumann-Maschine ist zwar gewiß nicht auf geradlinigem Weg entstanden, allerdings gab es auch keine Lösungen, die ihr »gleichwertig« waren. Nur diese Maschine besaß die Eigenschaft eines Universalrechners, während es sich bei allen alternativen Entwürfen durchweg um »drehorgelmäßig automatisierte Handkurbelmaschinen« (Bauer 1991: 31) und nicht-universelle Spezialrechner handelte. Pinchs und Bijkers stark relativistische Theorie der Technikgenese ist bereits für die von ihnen selbst gewählten Beispiele problematisch und läßt sich um so weniger auf die Entstehung des Computers anwenden. Die Von-Neumann-Architektur wurde nicht als Folge der Reputation dieses Mathematikers zur Standardarchitektur des Computers, sondern von Neumann ist aufgrund seiner Reputation später die Erfindung dieser Maschine zugeschrieben worden, während die Beiträge anderer zu ihrer Entwicklung weitgehend in Vergessenheit gerieten. Die Selektion des nach ihm benannten Rechners basierte aber durchaus auf der wissenschaftlichen und technischen Überlegenheit des technischen und logischen Designs dieser Maschine gegenüber den Entwürfen etwa von Zuse, Stibitz oder Aiken.

65 So auch Rammert, der die Ansicht vertritt, »daß die Auswahl der Von-Neumann-Architektur aus einer Vielzahl parallel vorhandener Maschinenvarianten und ihre Durchsetzung als herrschendes ›technologisches Paradigma‹ als sozialer Selektionsprozeß anzusehen sind: Die überlegenen diskursiven Kompetenzen von Neumanns, die starke publizistische Tätigkeit seiner Entwicklungsgruppe, die Aufmerksamkeit, die er und die Institutionen, in denen er arbeitete, genossen, sorgten mehr als ihre wirklichen technischen Entwicklungsleistungen für den durchschlagenden Erfolg der von ihnen erst spät realisierten Computervariante« (Rammert 1995: 22).

So wenig wie die Entstehung des Computers einem Phasenmodell à la Kuhn entsprach, so wenig haben die Computerpioniere diese Maschine auch als den »theoretischen Kern einer neuen Wissenschaft« (Mainzer 1979: 132) begriffen, die sich dann ihrerseits wiederum paradigmatisch konsolidierte hätte. Die Geburtsstunde des Computers war nicht zugleich auch die Geburtsstunde der Computer science und Informatik, und diese neue Maschine führte zunächst keineswegs zu einer Bündelung der Forschungsaktivitäten und kumulativen Erkenntnisfortschritten. Ihre Entdeckung löste vielmehr sehr unterschiedliche Auffassungen darüber aus, zu welchen Zwecken sich diese Maschine einsetzen ließ und wie sie theoretisch und methodisch zu behandeln war. Soweit der Begriff überhaupt verwandt wurde, spaltete sich die Computerwissenschaft anfänglich in eine weitgehend theorielose Praxis der Programmierung und in hoch spekulative Forschungsgebiete wie die der Kybernetik und Künstlichen-Intelligenz-Forschung (KI-Forschung) auf. Mit formalen Modellen der Programmierung und formalen Hochsprachen hat sich die frühe Computer science nicht oder nur sehr randständig befaßt. Die ersten höheren Programmiersprachen sind denn auch nicht in der Wissenschaft, sondern bei den kommerziellen Herstellern der Maschinen und rund zehn Jahre nach der Entdeckung des Computers entstanden.

Die Informatik hat sich erst im Verlauf der sechziger Jahre, und nicht als »autonome Wissenschaftsentwicklung« (Mainzer 1979: 121), sondern parallel zu den immer umfangreicheren Anwendungen des Computers im militärischen und kommerziellen Bereich und als Reaktion auf die wachsenden Komplexitätsprobleme der Programmierung herausgebildet. Die moderne Softwaretechnik ist nicht aus der Wissenschaft, sondern aus den militärischen Nachkriegsprojekten der amerikanischen Regierung hervorgegangen, die dann nur kurze Zeit später auch die kommerzielle Entwicklung von Programmen in den USA induziert haben. Wie der Computer selbst entwickelte sich auch diese Technik wieder durch »bricolage« und theorieloses experimentelles Konstruieren. Erst die wachsenden Komplexitätsprobleme und zunehmend krisenhafte Entwicklung der Softwaretechnik, die sich als Folge dieses theorielosen Experimentierens einstellten, haben dazu geführt, daß sich die Computer science im Verlauf der sechziger Jahre in kumulativer Weise auf abstrakte Modelle und formale Methoden der Programmierung auszurichten begann und sich zur Informatik als der formalwissenschaftlichen Lehre von den Algorithmen und Programmen entwickelte, die sich zum Ziel setzte, die Softwaretechnik zu vereinheitlichen und zu normieren.

Diese Phase des kumulativen Wachstums der Informatik war allerdings nur von kurzer Dauer. Schien es am Ende der sechziger und Beginn der sieb-

ziger Jahre noch so, als könne sich das Fach im Sinne einer Normalwissenschaft stabilisieren, lief dann die Softwaretechnik als Folge der Koevolution (Ceruzzi 1985), die sie mit der Elektronik und Mikroelektronik eingegangen ist, dem wissenschaftlichen Wissen über das korrekte formale Design der Systeme erneut weit voraus, während die explosionsartig ansteigenden programmiertechnischen Möglichkeiten zugleich auch innerhalb der Informatik selbst zu einer überschießenden Vielfalt von theoretischen und methodischen Ansätzen führten. Das Fach hat sich damit nie um ein stabiles Set von Forschungsaufgaben zentrieren, geschweige denn wie die Kernphysik eine optimale Technologie definieren und sich an dieser Technologie kognitiv und sozial ausrichten können. Es entspricht im Modell Richard Whitleys sehr genau der rastlos innovativen, aber schwach koordinierten Welt des Quadranten (4) (vgl. Kap. 1: 40). Die Informatik ist vom Status einer Normalwissenschaft weit entfernt, und hat es nie vermocht, eine vereinheitlichende und normierende Rolle gegenüber der Softwaretechnik einzunehmen. Ihre Identität ist heute wieder heftig umstritten, zumal mit dem Vordringen der Softwaretechnik in immer vielfältigere und heterogenere Anwendungsbereiche auch in immer größerem Maße kontextuelle Wissenskomponenten in der Programmierung an Bedeutung gewonnen haben, die sich der formalen Theoriebildung der Informatik entziehen.

Die folgenden beiden Abschnitte haben die Aufgabe, zunächst die Entstehung des Computers, danach die der Informatik zu rekonstruieren. Daran schließt im fünften Kapitel der Arbeit ein Abriß der Entwicklung dieses Fachs bis zum Beginn der neunziger Jahre an, der es dann auch erlaubt, die Frage zu beantworten, warum die informatische Großforschung anders als ihr kerntechnisches Vorbild nie auf einen stabilen Erfolgskurs gelangen konnte.

4.2 Frühe Rechentechnik und formale Logik

In nahezu allen historischen Darstellungen zur Entstehung des Computers findet sich heute die Behauptung, daß Charles Babbage mit seiner »analytical engine« bereits um 1830 die Turingmaschine »antizipiert« und den modernen Computer »vorweggenommen« habe (Randell 1980: 79). Seine Erfindung soll zudem als Vorbild des theoretischen Modells von Turing beziehungsweise des Von-Neumann-Rechners fungiert haben. Babbage selbst sei an der Realisierung des Computers nur deshalb gescheitert, weil die Fein-

mechanik des 19. Jahrhunderts die hohen fertigungstechnischen Ansprüche, die sein Rechner stellte, noch nicht erfüllen konnte.

Tatsächlich hat Babbage die erste programmierbare Rechenmaschine entworfen, aber »der Computer im eigentlichen Sinne war für ... Babbage strikt undenkbar« (Lévy 1994: 910). Er verfolgte das ausschließlich praktische Ziel, das Rechnen zu mechanisieren und zu rationalisieren, und sein Werk enthält nichts, was auch nur andeutungsweise auf eine theoretische Auseinandersetzung mit einer Universalmaschine oder gar der Programmierung hinauslief. Die »analytical engine« entstand in rein experimenteller Weise und hatte kein theoretisches, sondern ein soziales Modell der Organisation des Rechnens zum Vorbild.

Babbage entlehnte die Idee des mechanischen und maschinellen Rechnens der Organisationsform der »Logarithmenmanufaktur« von Gaspard Marie Riche und der dort praktizierten arbeitsorganisatorischen Zerlegung und Aufteilung von Rechenvorgängen. Riche hatte als Direktor des Pariser Katasteramts am Beginn des neunzehnten Jahrhunderts eine regelrechte Fabrik zur Herstellung mathematischer Tafeln aufgebaut, in der eine strikte Arbeitsteilung nach quasi-tayloristischen Prinzipien herrschte (Lévy 1994: 912). Mathematiker entwarfen nach der Methode der Differenzenrechnung einen allgemeinen Rechenplan, der von »niederen« Personal ausgeführt wurde, das sich auf nichts anderes als Additionen verstand.

Babbage inspirierte die »Logarithmenmanufaktur« 1823 zunächst zur Konstruktion der »difference engine«, einer aus simplen, hintereinander geschalteten Addiervorrichtungen bestehenden Einzweckmaschine, die kostengünstiger und vor allem zuverlässiger arbeiten sollte als die fehleranfälligen menschlichen »Computoren« (Lévy 1994: 912). Finanziert wurde die Entwicklung der »difference engine« durch die britische Marine, die daran interessiert war, die mit Fehlern übersäten nautischen und astronomischen Tafeln zu verbessern.

Beim Entwurf der »analytical engine«, die Babbage etwa zehn Jahre nach der »difference engine« konzipierte, und deren Entwicklung ebenfalls von der britischen Regierung gefördert wurde, verband er dann den Rechenplan der »Logarithmenfabrik« mit dem der »Jacquardmaschine«, dem lochkartengesteuerten Webstuhl, der seit dem Beginn des 19. Jahrhunderts seinen Siegeszug in der Textilindustrie antrat (Lévy 1994: 911–912). Mit der Hilfe unterschiedlich gelochter Karten oder Holzplättchen konnte die »Jacquardmaschine« variable Webmuster erzeugen. Babbage übertrug die Idee der Lochkartensteuerung auf die »analytical engine«, die nach dem gleichen Prin-

zip variable Berechnungen ausführen und in gleicher Weise wie Jacquards Webstühle durch eine Dampfmaschine angetrieben werden sollte.

Marginale Bemerkungen von Lady Ada Lovelace, der Assistentin von Babbage, die behauptete, die »analytical engine« sei in der Lage auszuführen, »was immer wir ihr zu befehlen wissen« (zitiert nach Turing 1987: 169), sind später in dem Sinne gedeutet worden, daß es sich um eine Universalmaschine gehandelt habe (Kaufmann 1974). Aber selbst wenn man davon absieht, daß weder Lady Lovelace noch Babbage rund hundert Jahre bevor in der Mathematik die Theorie der berechenbaren Funktion entwickelt wurde, gar keinen Begriff von einer Universalmaschine haben konnten, war dies auch bereits rein technisch unmöglich. Eine algorithmische Universalmaschine ist dadurch definiert, daß sie allgemeine Rekursionen und damit alle berechenbaren Funktionen ausführen kann. Dies setzt voraus, daß sie speicherintern programmiert wird und ihr interner Speicher zugleich über die Möglichkeit der relativen Addressierung verfügt. Erst unter diesen Voraussetzungen kann ein Rechner bedingte Sprunganweisungen mit Rückwärts- und Vorwärtsverzweigungen ausführen und ein Programm selbsttätig abändern, um rekursive Funktionen durch Schleifen nachzubilden.

Im Fall der »analytical engine« waren jedoch beide Voraussetzungen nicht gegeben. Babbages Maschine wurde extern durch Lochkarten programmiert und verfügte über einen Speicher mit absoluten Adressen (vgl. Hauge-land 1986: 125–136). Demzufolge konnte die »analytical engine« selbst dann nicht universal sein, wenn man das Programm in den Speicher verlegt hätte (Lévy 1094: 910).⁶⁶ Im übrigen fehlten aber auch dafür die Voraussetzungen. Die »analytical engine« ist später in mehreren Exemplaren nachgebaut worden und erwies sich tatsächlich als prinzipiell funktionstüchtig. Allerdings war sie extrem langsam, und es ist nicht zu sehen, wie ihr winziger Speicher Daten und Programme gleichzeitig hätte aufnehmen können (Goldstine 1972: 12). Selbst die elektromechanischen Relaisrechner der dreißiger und vierziger Jahre verfügten hierfür über eine zu geringe Arbeitsgeschwindigkeit und zu kleine Speicher. Erst die schnellen elektronischen Maschinen

66 Auf einem extern programmierten Rechner lassen sich nur Zählschleifen mit einer vorgegebenen, endlichen Anzahl von Schritten realisieren, da das Programm während seines Ablaufs nicht verändert werden kann. Zählschleifen führen aber lediglich zur Klasse der sogenannten primitiven Rekursionen, die eine Unterklasse der berechenbaren Funktionen bildet. Auch absolute Speicheradressen lassen nur Zählschleifen und damit ebenfalls keine allgemeine Rekursion zu. Vgl. hierzu die entsprechenden Stichworte »Schleife« und »Rekursion« in Duden Informatik (1993).

mit ihren vergleichsweise großen Speicherkapazitäten erlaubten den Übergang zur speicherinternen Programmierung.

Goldstine sieht den Hauptgrund für Babbages Scheitern auch weniger in fertigungstechnischen Schwierigkeiten als in der extrem langsamen Operationsweise der »analytical engine«, mit der er sein Ziel, das Arbeitstempo menschlicher Computoren zu übertreffen, verfehlte.

»This rate of operation was just not fast enough to revolutionize computation and was ... one of the basic reasons why his work more or less disappeared from view« (Goldstine 1972: 12). Babbages Werk geriet für fast hundert Jahre in Vergessenheit und wurde erst wiederentdeckt, als der Von-Neumann-Computer bereits existierte.⁶⁷

In diesen rund hundert Jahren kam es zu keinen weiteren Versuchen, programmierbare Rechner zu entwickeln, obwohl der wissenschaftliche, wirtschaftliche, administrative und militärische Rechenbedarf am Beginn dieses Jahrhunderts stark anstieg, und die Schalttechniken, auf denen dann später die Rechner von Zuse, Aiken und anderen basierten, bereits seit dem Beginn dieses Jahrhunderts zur Verfügung standen (Zuse 1970: 13–14; Heintz 1993: 211–220).⁶⁸ Mit Ausnahme der sogenannten Totalisatoren, die mit elektromechanischen Relais arbeiteten und am Ende der zwanziger Jahre in Großbritannien zur automatischen Registrierung von Pferdewetten entwickelt wurden (Lévy 1994: 925), ist die Möglichkeit, diese Techniken auf den Bereich des Rechnens zu übertragen, aber erst rund vierzig Jahre später entdeckt worden. Dann allerdings entstand fast zur selben Zeit und unabhängig voneinander eine Vielzahl von programmierbaren Rechnern auf der Basis der Relais- und Röhrentechnik.

Der wachsende gesellschaftliche Bedarf an Rechenleistungen wurde in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts hauptsächlich durch den massiven Einsatz von zumeist weiblichen »Computoren« abgedeckt, die ähnlich wie in der Logarithmenmanufaktur von Riche im Rahmen einer hoch taylorisierten Form von Arbeitsorganisation auf das Einfachste reduzierte rechnerische Aufgaben erledigten (Heintz 1993: 229–233). Erst in zweiter Linie bediente man sich maschineller Vorrichtungen zur Bewältigung des steigenden Re-

67 So spricht auch der Duden Informatik, der lange Zeit die These von der »analytical engine« als Vorläufer des modernen Computers vertrat, neuerdings nur noch von »modern anmutenden« Konstruktionsmerkmalen dieser Maschine (Duden Informatik 1993: 312).

68 Elektromechanische Relais dienten seit 1890 in der Telephonie zur Schaltung von Gesprächsleitungen (Überliessen), und die Elektronenröhre wurde ab 1913 in der Funk- und Radiotechnik eingesetzt. Seit 1919 war in der Telephonie bekannt, daß sie auch als digitale Schaltelemente benutzbar waren (Vorndran 1986: 91).

chenbedarfs. Wo es, wie etwa in den öffentlichen Verwaltungen, auf die Erfassung und Verarbeitung von großen Datenmengen ankam, setzte sich die elektromagnetische Sortier- und Zählmaschine von Hermann Hollerith durch, der dieses Gerät im Jahr 1886 entwickelte und dabei ähnlich wie bereits Babbage Anleihen bei der Lochkartengesteuerten Jacquardmaschine machte. In diesem Fall wurden die vom Webstuhl her bekannten Lochkarten jedoch nicht als Programmspeicher, sondern als Datenträger verwandt. Diese stark verbreiteten Lochkartenmaschinen sind dann insbesondere von der Firma International Bureau Machines (IBM), die aus der Tabulating Machine Corporation von Hermann Hollerith hervorging (vgl. Petzold 1985: 273–281), ständig verbessert worden und standen später in einer hoch entwickelten Form als Ein- und Ausgabegeräte für die ersten elektronischen Computer zur Verfügung. Im Bereich des wissenschaftlichen Rechnens und in der Militärtechnik, wo es weniger um die Verarbeitung großer Datenmengen als um die Lösung von komplizierten und häufig wiederkehrenden Gleichungen ging, entstand dagegen eine Fülle von mechanischen und später auch elektronischen Analogrechnern. Diese Analogrechner dienten durchweg speziellen Aufgaben und starben dann mit dem Siegeszug des digitalen Universalcomputers in den fünfziger und sechziger Jahren rasch aus (Lévy 1994: 922–923).

Sowenig wie die prinzipiell vorhandenen Schalttechniken zu programmierbaren Rechnern führten, sowenig gingen auch aus der Mathematik und Logik Impulse für die Entwicklung solcher Maschinen aus. Mathematik und Technik blieben bis weit in das zwanzigste Jahrhundert vollkommen getrennte Welten. Anders als dies vor allem bei Mainzer, aber auch in zahlreichen wissenschaftshistorischen Arbeiten dargestellt wird, gibt es keine direkte Linie zwischen den Anfängen der formalen Logik und der Entwicklung von Rechenmaschinen. So wird sowohl in der wissenschaftshistorischen als auch in der wissenschaftssoziologischen Literatur immer wieder das Programm von Leibniz zur Formalisierung und Kalkülisierung der Logik mit dem Beginn des maschinellen Rechnens gleichgesetzt, das schließlich in der Entwicklung des Computers kulminierte (Mainzer 1979, 1985; vgl. auch Krämer 1994).

Tatsächlich ist die Entwicklung der Logik selbst in starkem Maße von Brüchen und Diskontinuitäten gekennzeichnet, in deren Folge das Programm von Leibniz »problemgeschichtlich belanglos« (Bochenski 1956: 302) blieb.⁶⁹ Leibniz war zwar einer der ersten Mathematiker, die sich im 17.

⁶⁹ So kommt Bochenski, der Autor des wohl umfassendsten Werks über die historische Entwicklung der Logik zu dem Ergebnis: »Die Logik weist keine kontinuierliche und kumu-

Jahrhundert mit der Formalisierung und Kalkülisierung der Logik befaßten, er kann aber nicht als Begründer der formalen Logik gelten.⁷⁰ Sein Programm fiel in der Periode der klassischen Logik, die Bochenski zufolge »nur eine dekadente Form unserer Wissenschaft, eine ›tote Periode‹ ihrer Entwicklung« war (ebd.: 20), auf fruchtlosen Boden. Die Arbeiten von Leibniz zur Formalisierung der Logik blieben unveröffentlicht und »wurden erst am Ende des 19. Jahrhunderts entdeckt, als die von ihm behandelten Probleme sich schon unabhängig von ihm wieder entwickelt hatten« (ebd.: 302). Erst Mitte des 19. Jahrhunderts und unabhängig von Leibniz' Werk erlebte die formale Logik mit der Algebra der Logik und den 1854 erschienenen Schriften von George Boole »The Mathematical Analysis of Logic« und »An Investigation of the Laws of Thought« (Krämer 1994: 121–124) eine Renaissance.

Doch auch dann blieben die Beiträge der Logik und Mathematik für die Entwicklung der Rechentechnik marginal. Die Boolesche Algebra führte nicht zu einer »Logik für die Technik«, sondern zu einer »Technik für die Logik« (Zemanek 1991: 49). So konstruierte W. Stanley Jevons auf der Grundlage der Booleschen Arbeiten 1869 die erste mechanische Logikmaschine, der dann bis in die dreißiger Jahre dieses Jahrhunderts sechs weitere ähnliche Maschinen folgten.⁷¹ Aber keine dieser Maschinen hatte einen praktischen Nutzen. Sie wurden ausschließlich dazu entwickelt, die prinzipielle Möglichkeit der maschinellen Ausführung von logischen Operationen zu demonstrieren, dienten als Kuriosa spielerischen Zwecken und blieben für die Rechentechnik folgenlos.⁷²

Obwohl mit der Booleschen Algebra im Prinzip auch die moderne Schaltalgebra und damit ein logisches und technisches Instrumentarium zur Verfügung stand, das sich unmittelbar auf das maschinelle Rechnen hätte anwenden lassen, blieb ihr potentieller technischer Nutzen lange Zeit uner-

lative Entwicklung auf. Vielmehr gleicht das Bild ihrer Geschichte einer zerissenen Linie« (Bochenski 1956: 14).

70 Seinen Schriften kommt zwar gegenüber den Arbeiten der Logiker des 19. Jahrhunderts Priorität zu, Leibniz war aber nicht der »créateur de la logistique moderne« (Blanché 1970: 190).

71 Eine umfassende historische Darstellung über die Entwicklung der Logikmaschinen liefert Gardner (1958). Kürzere Abrisse finden sich bei Trajan (1962) und Zemanek (1962).

72 Diese rein demonstrative Funktion und spielerischen Zwecke der frühen Inferenzmaschinen treten am Beispiel des automatischen Schachspielers, den der spanische Erfinder Torres y Quevedo um 1920 konstruierte, wohl noch am deutlichsten hervor. Der menschliche Spieler verfügte über einen König und die Maschine über einen König und einen Turm. Die Maschine gewann immer (vgl. Lévy 1994: 905).

kannt und die formale Logik bis weit in das zwanzigste Jahrhundert eine rein innermathematische Angelegenheit. Booles Algebra der Logik führte am Beginn des 20. Jahrhunderts auf das neue Feld der Metamathematik. Sie mündete im sogenannten formalistischen Programm von David Hilbert und dessen Versuch, die Mathematik durch ihre vollständige Axiomatisierung neu zu begründen und ihr ein sicheres logisches Fundament zu schaffen. Hilberts Programm löste dann in den zwanziger und dreißiger Jahren einen grundlagentheoretischen Streit aus, um den sich die mathematische Forschung lange Zeit zentrierte und aus dem dann auch die Turingmaschine hervorging.⁷³

Die Anwendungsmöglichkeiten der Booleschen Algebra wurden nicht zuerst in der Rechentechnik, sondern in der Telegraphie und Telephonie entdeckt, wo mit der seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts einsetzenden Verbreitung von Fernmelde- und Fernsprechanlagen ein wachsender Bedarf nach effizienten Verfahren für die Konstruktion von Schaltwerknetzen entstand. Die Telephonie und nicht etwa die Rechentechnik selbst bildete den »Nährboden« (Zemanek 1991: 50) für die Entwicklung der Schaltalgebra. Doch auch dort setzten sich formale Verfahren erst langsam und allmählich durch. Die ersten Arbeiten, die sich damit beschäftigten, die komplexen Schaltkombinationen von Telefonnetzen mit Hilfe einer sogenannten Kontaktalgebra »auszurechnen«, blieben unbeachtet (ebd.: 51–53). Auch dem 1938 erschienenen Grundlagenwerk der Schaltalgebra »A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits« von Claude E. Shannon wurde zunächst wenig Aufmerksamkeit geschenkt (ebd.: 53).

Die Schaltalgebra führte auch nicht auf einem geradlinigem Weg zum maschinellen Rechnen. So wie sich die Schalttechniker in der Hauptsache »raffinierter Tricksammlungen« und der »intuitiven Logik« bedienten (Zemanek 1991: 49, 53), waren auch die meisten Konstrukteure der ersten pro-

73 Booles Algebra der Logik wurde von Augustus De Morgan, W. Stanley Jevons, Ernst Schröder und anderen systematisch ausgebaut und erweitert. Die »Begriffsschrift« von Gottlob Frege aus dem Jahr 1879 leitete dann mit dem Übergang von der Algebra der Logik zum Logizismus eine neue Phase in der mathematischen Logik ein, die vor allem durch die in den Jahren 1902 bis 1913 erschienen »Principia Mathematica« von Alfred North Whitehead und Bertrand Russell geprägt wurde. Hatte Boole noch das Ziel verfolgt, die Logik auf die Arithmetik zurückzuführen und als Teilgebiet der Mathematik zu etablieren, so ging es seit Frege und den »Principia Mathematica« von Whitehead und Russell darum, die Arithmetik auf die formale Logik zu reduzieren und zu axiomatisieren. Dies war vor allem das Ziel von David Hilbert, der im Anschluß an die »Principia Mathematica« um 1917 sein beweistheoretisches Programm zur Neubegründung der Mathematik formulierte (Krämer 1988: 138–146).

grammierbaren Rechenmaschinen weder mit der formalen Logik noch mit deren Anwendungen in der Telephonie vertraut und haben die moderne Aussagenlogik für ihre Zwecke nicht selten neu erfunden. Ihre Blüte erlebte die Schaltalgebra erst am Ende der vierziger Jahre als Folge des Computers und der allmählich entstehenden Computer science, die jetzt auf die theoretischen Arbeiten der Nachrichtentechnik zurückgreifen konnte. Als Shannon »1949 ein zweites Mal den gleichen Stoff veröffentlicht, ist die Zeit reif, und nun ruft seine Arbeit eine Flut von Publikationen hervor« (ebd.: 53).

4.3 Abstrakte und konkrete Maschinen

Sowenig wie von der formalen Logik Impulse für das maschinelle Rechnen ausgingen, sowenig hat auch das mathematische Maschinenmodell, das Alan M. Turing 1936 erarbeitete, zur Entwicklung des Computers geführt. Turings Modell wies keinen Bezug zu konkreten Rechenmaschinen auf und hat deren Bau zu keiner Zeit angeleitet. Seine Bedeutung für die theoretische Beschreibung des Computers wurde erst entdeckt, nachdem er entstanden war. Die Turingmaschine war eine abstrakte »Papiermaschine« (Heintz 1993: 63), die der britische Mathematiker und Logiker ausschließlich zu Beweis-zwecken und zur Widerlegung des formalistischen Programms entwarf, das Hilbert mit dem Ziel formuliert hatte, die Mathematik neu zu begründen.

Hilbert hatte in den zwanziger Jahren postuliert, eine streng formalisierte Mathematik werde sich in dem Sinne als vollständig, widerspruchsfrei und entscheidbar erweisen, daß alle ihre Sätze aus einem umfassenden Axiomensystem deduziert werden konnten und ein allgemeines Verfahren existierte, mit dem sich entscheiden ließ, ob eine beliebige mathematische Funktion berechenbar war oder nicht.⁷⁴ Hilberts Programm scheiterte, und die Widerlegung seiner Postulate entzog der Mathematik ihr scheinbar sicheres Fundament. Kurt Gödel bewies 1931, daß in jedem beliebigen arithmetischen System immer wahre Sätze existierten, die nicht aus dem System selbst abgeleitet werden können, und damit jedes formale Axiomensystem notwendigerweise unvollständig ist. Darüber hinaus konnte Gödel beweisen, daß auch die Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems nicht aus ihm selbst

⁷⁴ Das Gegenprogramm zum Hilbertschen Formalismus bildete der sogenannte Intuitionismus von L. E. J. Brouwers (Heintz 1993a: 16–44; vgl. auch Krämer 1994).

abgeleitet werden kann. Ein solcher Beweis kann nur mit Schlußregeln geführt werden, die nicht in dem System selbst enthalten sind.⁷⁵

Im Anschluß an Gödel setzte sich unter anderen Turing Mitte der dreißiger Jahre mit Hilberts drittem Postulat auseinander, demzufolge ein allgemeines Verfahren existieren mußte, mit dem die Berechenbarkeit einer beliebigen mathematischen Funktion entschieden werden konnte. Turing gelang der Nachweis, daß es ein solches Verfahren nicht gibt, indem er den Begriff des Algorithmus in einem intuitiven Sinne als eine Rechenvorschrift definierte, die in einer endlichen Zahl von eindeutig festgelegten Operationsschritten zu einem bestimmten Ergebnis führt. In seinem 1937 erschienenen Aufsatz »On Computational Numbers. With an application to the Entscheidungsproblem« (Turing 1987a [1937]) zeigte Turing dann, daß jede beliebige mechanische Rechenvorschrift von einer gedachten Maschine ausgeführt werden konnte, die aus einem unendlichen, in Felder eingeteilten Band und einem Schreib-Lese-Kopf bestand, der die vier Anweisungen »Löschen oder Beschriften eines Felds«, »Nach-links-Gehen«, »Nach-rechts-Gehen«, »Anhalten« befolgte.

Eine Rechenvorschrift ließ sich damit als eine Liste von Befehlen wie »Schreibe ein Zeichen«, »Gehe nach links«, »Lösche ein Zeichen« usw. definieren, die Turing »Verhaltenstabelle« nannte. In dieser Fassung des Algorithmusbegriffs existierten nun genau so viele Turingmaschinen mit entsprechenden Verhaltenstabellen wie berechenbare Funktionen. Im Falle einer eindeutig definierten Funktion kam die gedachte Maschine nach einer endlichen Zahl von Schritten zu einem Ergebnis und hielt an. War die Funktion dagegen nicht definiert, kam die Maschine zu keinem Ergebnis, der Algorithmus brach nicht ab, und die Maschine geriet in eine endlose Schleife (Turing 1987a [1937]).

Vor diesem Hintergrund formulierte Turing jetzt die Hilbertsche Frage, ob ein allgemeines Verfahren existierte, mit dem sich für jede beliebige mathematische Funktion entscheiden ließ, ob sie berechenbar war oder nicht, in die Frage um: Gibt es eine Turingmaschine, die für jede beliebige andere Turingmaschine entscheiden kann, ob sie anhält oder nicht? Die einfachste Art, den Nachweis zu führen, daß es eine solche »Entscheidungsmaschine«

75 Für den Beweis muß man ein »stärkeres Systems« heranziehen, dessen Widerspruchsfreiheit aber wiederum nur durch ein »stärkeres System« usw. bewiesen werden kann. Ein finiter Beweis der Widerspruchsfreiheit eines formalen Systems, um den es Hilbert ging, war also unmöglich (vgl. zu diesem mathematischen Grundlagenstreit ausführlicher: Hodges 1989: 107–130; Heintz 1993a: 16–106).

nicht geben kann, besteht in dem berühmten Selbstanwendungsproblem, das sich heute in jedem Lehrbuch der Informatik findet. In diesem Fall soll eine Turingmaschine darüber entscheiden, ob das in ihrer eigenen Verhaltenstabelle enthaltene Programm terminiert oder nicht. Diese Turingmaschine aber müßte anhalten, wenn das Programm nicht anhält, und nicht anhalten, wenn das Programm anhält. Durch diesen unauflösbaren Widerspruch war nun auch das dritte Postulat Hilberts widerlegt und das beweistheoretische Programm endgültig gescheitert.

Turings abstraktes Maschinenmodell erwies sich zudem als äquivalent zu der Theorie der berechenbaren Funktionen, die Herbrand und Gödel beziehungsweise Church und Cline ebenfalls im Jahr 1936 entwickelten. Während Hilbert zunächst angenommen hatte, daß die Klasse der berechenbaren Funktionen mit den sogenannten primitiv-rekursiven Funktionen identisch sei, konnte Ackermann 1928 nachweisen, daß es berechenbare Funktionen gibt, die nicht primitiv-rekursiv sind. Im Anschluß an Ackermanns Beweis zeigten dann Herbrand und Gödel sowie Church und Cline, daß die primitiv rekursiven Funktionen nur eine Unterklasse der berechenbaren Funktionen bilden und die Klasse der berechenbaren Funktionen mit den allgemein-rekursiven Funktionen zusammenfällt (Krämer 1984; Hodges 1989).

Church formulierte vor diesem Hintergrund dann noch im selben Jahr seine berühmte These, daß der Begriff der allgemein-rekursiven Funktionen mit dem Begriff der Turingberechenbarkeit identisch ist, und die Turingmaschine somit alle berechenbaren Funktionen ausführen kann. Diese sogenannte Churchsche These läßt sich allerdings nicht beweisen, da Turings Maschinenmodell ja auf einem intuitiven Begriff des Algorithmus basiert. Dennoch wird sie heute allgemein anerkannt und sogar zu Beweis Zwecken akzeptiert (vgl. Duden Informatik 1993: 129), da sie sich experimentell-empirisch erhärtet hat und alle bisher bekannten berechenbaren Funktionen Turing-berechenbar sind.

Tatsächlich hätte die Turingmaschine damit im Prinzip auch als theoretisches Vorbild für die Entwicklung des modernen Computers dienen können. Die Turingmaschine und der Computer sind logisch isomorph. Eine Turingmaschine ist durch einen Computer genauso beschreibbar, wie es für jedes Computerprogramm eine Turingmaschine gibt (vgl. Duden Informatik 1993: Stichwort Turingmaschine, 737–742). Computer lassen sich als universelle Turingmaschinen auffassen, die, einen hinreichend großen Speicher vorausgesetzt, jeden berechenbaren Algorithmus ausführen können. Der Begriff der berechenbaren Funktion wird deshalb heute auch mit dem Begriff der programmierbaren Funktion gleichgesetzt (Rechenberg 1991: 159–163). Aber

die logische Isomorphie der Turingmaschine und des Computers implizierte keinen kausalen Bedingungs-zusammenhang zwischen der Universalmaschine als theoretischem Modell und als technischem Artefakt. Turings Modell war weder im Hinblick auf das logische noch auf das technische Design einer konkreten Universalmaschine instruktiv. Es enthielt keine Theorie der Speicherorganisation solcher Maschinen und keinen Hinweis darauf, wie sich allgemein-rekursive Funktionen auf physikalischen Rechnern nachbilden ließen.

Turing hat auch dann keine solche Theorie entwickelt und den Versuch unternommen, seine abstrakte Maschine technisch zu realisieren, als er mit den elektromechanischen und elektronischen Rechnern in Berührung kam, die während des Zweiten Weltkrieges im Auftrag des britischen Geheimdienstes in England entwickelt wurden. Seine Beteiligung an der Entwicklung dieser militärischen Rechner wird in der wissenschaftshistorischen und wissenschaftssoziologischen Literatur durchweg als Fort- und Umsetzung seiner theoretischen Arbeiten interpretiert (vgl. z.B. Mainzer 1979; Randell 1980; Heintz 1993). Tatsächlich jedoch ist der Bau einer Universalmaschine auch im Rahmen der Rechnerprojekte des britischen Geheimdienstes nie ins Auge gefaßt worden. Turing arbeitete dort in der Hauptsache an kryptologischen Problemen und war mit der Entwicklung der Rechner selbst nur marginal befaßt.

Bei diesen Rechnern handelte es sich im wesentlichen um die sogenannte »Bombe«⁷⁶ sowie um »Colossus«, die beide einzig mit dem Ziel entwickelt wurden, den verschlüsselten Funkverkehr der deutschen Wehrmacht zu dechiffrieren. Die »Bombe« war speziell darauf ausgelegt, den Code der Chiffriermaschine »Enigma« zu brechen, mit der die deutsche U-Boot-Flotte ihren Funkverkehr verschlüsselte.⁷⁷ Bei der Entwicklung dieser Maschine ging es im wesentlichen um kryptologische Anwendungen der Wahrscheinlichkeitstheorie und Kombinatorik, die in keinem Zusammenhang mit Turings Arbeiten vor dem Zweiten Weltkrieg standen (Hodges 1989: 210).⁷⁸

76 Diesen Namen erhielt die Maschine aufgrund des laut tickenden Geräusches, das die elektromechanischen Relais während des Betriebs abgaben (Hodges 1989: 203).

77 Die Aufklärungsarbeit des britischen Nachrichtendienstes gilt heute als kriegsentscheidend, da mit der Entschlüsselung des deutschen Funkverkehrs Hitlers U-Boot-Flotte nahezu wirkungslos und selbst extrem verwundbar wurde (vgl. dazu und zum Beitrag Turings zur Entschlüsselung der Enigma ausführlich Hodges 1989: 187–280).

78 Das Basismodell der »Bombe« war bereits vor dem Ausbruch des Zweiten Weltkriegs in Polen entwickelt worden. Turing entwarf 1940 eine leistungsfähigere Version dieser Dechiffriermaschine, indem er sie nach bestimmten Wahrscheinlichkeitswerten, die auf tech-

Auch der 1943 fertiggestellte elektronische Rechner Colossus stand in keinem Zusammenhang mit der Turingmaschine. Colossus war vielmehr das Werk von Post- und Telefonbau-Ingenieuren, die sich dafür begeisterten, die träge elektromechanische Relais-technik durch schnelle elektronische Schaltungen zu ersetzen und diese Idee in einer Situation auf die Rechentechnik übertrugen, als die Arbeitsgeschwindigkeit der Dechiffriermaschinen zu einer kritischen Größe in der britischen Kriegsführung wurde.⁷⁹ Chefkonstrukteur von Colossus war T.H. Flowers, der bereits 1935 das erste elektronische Selbstwählnetz in Großbritannien entwickelte hatte.⁸⁰ Seiner kryptologischen Bestimmung gemäß war der Rechner speziell für »Boolean calculations of a particular type« (Randell 1980: 74) ausgelegt. Daß sich auf Colossus auch eine Reihe anderer Berechnungen ausführen ließen und die Maschine »sogar beinahe dazu gebracht werden konnte, numerische Multiplikationen auszuführen« (Hodges 1989: 348), entdeckten erst Mathematiker, die sie später zu anderen als militärischen Zwecken benutzten.

Sowenig wie Turing die Umsetzung seiner »Papiermaschine« angestrebt hat, sowenig haben dies auch die Konstrukteure anderer programmierbarer Rechner in den späten dreißiger und frühen vierziger Jahre getan. Auch die Rechner von Konrad Zuse oder George Robert Stibitz und Howard Aiken, die kurze Zeit vor oder gleichzeitig mit Colossus in Deutschland bezie-

nischen Merkmalen der »Enigma« basierten, auf logische Konsistenzbedingungen prüfen ließ. Hierdurch gelang es, die riesige Anzahl der kombinatorisch möglichen Chiffren des Klartextes auf vergleichsweise wenige plausible Schlüsselstellungen zu reduzieren. Der Mathematiker Gordon Welchmann entdeckte dann wenig später in dem Entwurf von Turing eine Reihe weiterer logischer Implikationen, die eine »dramatische Verbesserung« (Hodges 1989: 211) der Maschine ermöglichten.

79 Der britische Nachrichtendienst sah sich 1942 mit dem Problem konfrontiert, daß sich die elektromechanischen Dechiffriermaschinen als zu langsam erwiesen, nachdem die deutsche Wehrmacht eine modifizierte Version der Enigma eingeführt hatte. Da Hitler zudem im selben Jahr persönlich die Leitung der deutschen Kriegsführung übernommen hatte, lief die Kommunikation zwischen den Spitzen der deutschen Wehrmacht jetzt sternförmig bei der obersten Heeresleitung in Berlin zusammen. Für den britischen Geheimdienst ergab sich hierdurch die Möglichkeit, den militärischen Funkverkehr von und nach Berlin abzuhören und sich damit einen direkten Zugang zu den strategischen Entscheidungen des Kriegsgegners zu verschaffen. Diese aber setzte elektronische Rechner voraus, die sehr viel schneller arbeiteten, als die elektromechanischen Dechiffriermaschinen (Hodges 1989: 299–310).

80 Turings Interesse an Colossus hielt sich in durchaus engen Grenzen. Er lehnte es sogar explizit ab, sich über eine Funktion als informeller Berater hinaus an dem Projekt zu beteiligen (Hodges 1989: 309). Während der Entwicklung von Colossus befaßte er sich vor allem mit der Entwicklung von »Delilah«, einer elektronischen Maschine zur Sprachverschlüsselung.

hungsweise den USA entstanden, waren durchweg keine Universalmaschinen. Ihre Entwicklung fügt sich weder einem Kuhnschen Phasenmodell, noch bildeten sie »gleichwertige Lösungen« (Heintz 1993a: 228) und vollwertige Alternativen zur Von-Neumann-Architektur. Wie Babbage verfolgten auch die Erfinder dieser Maschinen lediglich das Ziel, ein möglichst schnelles und flexibel verwendbares Rechengerät zu bauen. Bei der Konstruktion ihrer Rechner bedienten sie sich weitgehend der »intuitiven Logik«, und die technischen Spezifikationen ihrer Erfindungen stellten sich meist erst im Verlauf des Konstruktionsprozesses durch experimentelles Ausprobieren ein (Zemanek 1991).

Dies galt in ganz besonderem Maße für den deutschen Flugzeugingenieur und Erfinder-Unternehmer Konrad Zuse, der als erster die Idee verwirklichte, einen programmierbaren Rechner auf der Basis elektromechanischer Relais zu bauen. Zuse begann 1935 mit der Arbeit an seiner sogenannten Z-Reihe und stellte mit der Z-3 im Jahr 1941 einen ersten funktionstüchtigen Prototyp fertig. Zuse war Autodidakt und hatte sich zum Ziel gesetzt, die Rechenarbeit in der Flugzeugindustrie zu rationalisieren.⁸¹ Den Bau seiner Maschinen finanzierte er zunächst ausschließlich mit bescheidenen privaten Mitteln.⁸² Seine Kenntnisse über die Boolesche Algebra und formale Logik eignete er sich erst während der Entwicklung seiner Rechner an. Bei den Arbeiten an seiner Z-Reihe entdeckte er nach und nach, daß sich alle Schaltungsvorgänge, die zur Ausführung logischer Operationen und Zahlenrechnungen notwendig waren, auf die Verknüpfungen Und, Oder und Nicht reduzieren ließen. Diese Entdeckung arbeitete er zu einer »Allgemeinen Bedingungskombinatorik« aus, die er seinem ehemaligen Mathematiklehrer vorlegte. Der allerdings mußte ihn darauf aufmerksam machen, daß dieser Formalismus »längst unter dem Namen ›Aussagenkalkül‹ bekannt ist« (Zuse 1970: 69). Zuse studierte daraufhin die grundlagentheoretischen Werke der formalen Logik. Die noch kurz vor dem Zweiten Weltkrieg erschienene Arbeit

81 Zuse wollte es »nicht in den Kopf, daß lebende, schöpferische Menschen ihr kostbares Leben mit derart nüchternen Rechnungen verschwenden sollten. Da mußte doch etwas getan werden. ... Kann man diese Dinge nicht rationalisieren?« (Zuse 1970: 35).

82 Einen Antrag zur Förderung einer elektronischen Nachfolgeversion der Z-3, den sein Mitarbeiter Elektroingenieur Helmut Schreyer stellte, lehnte die deutsche Reichsregierung als »nicht kriegswichtig« ab (Petzold 1985: 316). Gegen Kriegsende erhielt Zuse dann eine geringe finanzielle Unterstützung der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt, mit deren Hilfe er die wieder elektromechanisch betriebene Z-4 konstruierte, die den Krieg schließlich als einzige seiner Maschinen überstand.

von Shannon blieb ihm jedoch unbekannt. Dementsprechend erfand er auch die Schaltalgebra neu.

Neben der formalen Logik und Schaltalgebra war, so Zuse, auch »die ›Turingmaschine‹ für uns noch kein Begriff« (ebd.: 97). Zuse hatte weder eine Theorie der Universalmaschine, noch waren seine Rechner Universalmaschinen. Sie wurden durch Lochstreifen (gestanzte Kinofilme) von außen gesteuert und basierten damit auf dem gleichen Prinzip der Programmierung, dessen sich bereits Babbage bedient hatte. Doch dieses Prinzip führte eben zu einer »nicht-universellen Babbage-Zuse-Maschine mit einer starren Struktur endlich vieler, allenfalls geschachtelter Schleifen«, die »keinerlei Möglichkeiten zur Indexberechnung, d.h. konkret zur Adressenänderung« boten (Bauer 1991: 31).⁸³

In anderer Hinsicht wiesen die Entwicklungen von Zuse sogar über die Von-Neumann-Maschine hinaus. Zuse entwickelte bereits die Idee der »automatischen Formelübersetzung« und entwarf für die Z-4 1945 mit dem sogenannten »Plankalkül« die weltweit erste höhere Programmiersprache. Aber sowohl der Plankalkül wie auch seine übrigen Arbeiten blieben außerhalb des deutschen Sprachraums völlig unbekannt. Sein Werk hat die Entwicklung der Rechentechnik nur marginal beeinflusst und wurde erst am Anfang der siebziger Jahre auf breiter Basis wiederentdeckt (vgl. Zuse 1980).

Neben Zuse wird auch häufig Georg Robert Stibitz, der in den Jahren 1937 bis 1940 an den Bell Telephone Laboratories einen programmierbaren Rechner mit der Bezeichnung »Modell 1« entwickelte, die Erfindung des modernen Computers zugeschrieben (Levy 1994: 924–926). Doch auch Stibitz und die Bell Labs waren weit davon entfernt, den modernen Computer zu erschaffen. Das Ziel, das Stibitz mit seiner Relaismaschine »Modell 1« anstrebte, bestand darin, die Arbeit mit Tischrechnern bei den Bell Labs zu automatisieren. Obwohl in der Vermittlungstechnik seit rund vierzig Jahren elektromagnetische Relais eingesetzt wurden, war bei der amerikanischen Telefongesellschaft bis dahin niemand auf die Idee gekommen, daß sich mit dieser Technik auch Rechner bauen ließen.⁸⁴ Erst Stibitz bemerkte, »that a

83 Zuse gibt an, diese Möglichkeit gesehen, den »fehlenden Draht« aber absichtlich nicht gezogen zu haben, da er davor zurückschreckte, mit der dann entstehenden Komplexität der Programmierung sozusagen die Büchse der Pandora zu öffnen (Zuse 1970: 99–100). Kenner des Werks von Zuse halten dies allerdings für eine »nachträgliche Reflexion« (Bauer 1991: 32).

84 Auch nicht Shannon als Autor des grundlegenden Werks der Schaltalgebra, der seit 1941 Mitarbeiter der Bell Labs war und im übrigen sowohl »On Computational Numbers« als auch Turing persönlich kannte (Hodges 1989: 289–293).

relais machine could do anything a desk calculator could do« (Stibitz 1980: 479). Sein »Modell 1« war ein für den unternehmensinternen Gebrauch bestimmter und auf den speziellen Rechenbedarf der Bell Labs zugeschnittener Rechner, der zunächst nur über die Möglichkeit zur Multiplikation und Division verfügte. Nach dem Kriegseintritt der USA entstanden dann im Auftrag der amerikanischen Regierung vier weitere solcher Maschinen, die jeweils speziellen Zwecken dienten. Auch diese Rechner hatten mit dem Computer so viel gemein wie die Kutsche mit dem Automobil. Sie wurden allesamt von außen programmiert und besaßen Speicher mit absoluten Adressen (vgl. Stibitz 1980).

Als der wichtigste Meilenstein auf dem Weg zum modernen Computer aber gilt der ASCC (Automatic Sequence Controlled Calculator) oder auch Harvard Mark I, den Howard Aiken fast gleichzeitig mit den Rechnern von Zuse und Stibitz in den Jahren 1937 bis 1944 in den USA konstruiert hat (vgl. z.B. Vorndran 1986: 85). Aiken entwickelte Mark I im Auftrag der amerikanischen Marine speziell für die Berechnung numerischer Gleichungen. Sein Projekt erregte weltweit großes Aufsehen und wurde trotz aller Bemühungen, es geheim zu halten, sogar der deutschen Reichsregierung bekannt, die Mark I an der Technischen Hochschule Darmstadt während des Zweiten Weltkrieges nachbauen ließ (Zuse 1970: 89–90). Beeindrucken konnte Aikens Rechner jedoch allenfalls durch seine Größe und seinen Energieverbrauch.

Was sein technisches und logisches Design anging, fiel Mark I noch weit hinter den Stand zurück, den Zuse in Deutschland und Stibitz in den USA zur gleichen Zeit bereits erreicht hatten. Mark I beruhte nicht auf der binären Relais-technik, sondern war eine elektromechanische Maschine, die aus dezimal arbeitenden Baugruppen von Zählrädern, Zahnstangen und elektromagnetischen Kupplungen bestand. Diese Bergwerkstechnik machte den Rechner zu einem im Vergleich zu den Konstruktionen von Zuse und Stibitz schwerfälligen Monstrum mit einer Länge von sechzehn Metern und fünf- unddreißig Tonnen Gewicht, dessen Arbeitsgeschwindigkeit beträchtlich hinter den binären Relaismaschinen zurückblieb.⁸⁵

Dennoch löste gerade diese Maschine die ersten kommerziellen Aktivitäten zur Entwicklung von programmgesteuerten Rechnern aus. Mark I war im Auftrag der US-Navy und unter der Leitung von Aiken bei der IBM gefertigt worden, die sich in der Folge des Projekts dem Bau eines eigenen

85 Zu den technischen Daten von Mark I vgl. Vorndran (1986: 53–88).

programmgesteuerten Rechners zuwandte. Dabei experimentierte das Unternehmen seit 1944 mit dem Einsatz von Röhren und stellte 1948 mit dem SSEC (Selective Sequence Electronic Calculator) eine der ersten elektronischen Maschinen fertig. Die Elektronik des SSEC simulierte aber weitgehend nur die mechanischen Bauteile von Mark I, wie dies im übrigen bei den elektronischen Nachfolgeversionen von Aikens erster Maschine Mark III und IV auch der Fall war (Ceruzzi 1989: 216). Sowohl die Mark-Serie als auch der SSEC von IBM waren keine Universalrechner, sondern wiederum nur extern programmierte Spezialmaschinen. Aiken hielt sogar dann noch an der externen Programmierung fest, als längst bekannt war, daß sich mit Hilfe speicherinterner Programme und der relativen Adressierung konkrete Universalmaschinen realisieren ließen (Bauer 1991: 32).

4.4 Die Entdeckung der Universalmaschine und das »lock-in« der Von-Neumann-Architektur

Die Vorgeschichte des Computers begann nicht mit den Rechnern von Zuse, Stibitz oder Aiken, sondern mit ENIAC, einer elektronischen Maschine, die der Physiker John W. Mauchly und der Elektronikexperte Presper J. Eckert an der Moore School of Electrical Engineering der Universität von Pennsylvania in den Jahren 1941 bis 1946 entwickelten. Die Moore School arbeitete unter anderem für das Ballistic Research Laboratory der amerikanischen Armee und wurde kurze Zeit nach dem Kriegseintritt der USA zu einem nationalen Zentrum für die Erstellung von Feuertafeln.⁸⁶ Zur Berechnung dieser Tafeln setzte man dort neben Tischrechnern vor allem den sogenannten Differentialanalysator ein, eine analoge und weit verbreitete Maschine zur Lösung von Differentialgleichungen (Burks 1980: 312).

Angesichts der immensen Rechenarbeit, die an der Moore School zu erledigen war, konzipierten Eckert und Mauchly mit ENIAC Anfang der vierziger Jahre eine elektronische Version des Differentialanalysators, die etwa tausendmal schneller arbeiten sollte als ihr mechanischer Vorgänger, und erhielten hierfür finanzielle Unterstützung durch das Ballistic Research Lab-

⁸⁶ Feuertafeln dienen der Bestimmung der ballistischen Trajektorien von Bomben, Geschossen oder Granaten. Jeder unterschiedliche Typus von Bombe, Geschöß oder Granate weist unterschiedliche ballistische Eigenschaften auf, die jeweils speziell berechnet werden müssen (vgl. Lévy 1994: 931).

oratory der US-Army.⁸⁷ Ein klares Konzept, wie sich dieses Vorhaben technisch umsetzen ließ und auf welchen Prinzipien die logische Organisation des Rechners beruhen sollte, besaßen die Konstrukteure von ENIAC freilich nicht. Zudem veränderten sich im Verlauf des Projekts auch laufend dessen Ziele, da sie immer mehr Möglichkeiten entdeckten, die Maschine mit zusätzlichen Funktionen auszurüsten und sie zu einem flexibel verwendbaren Mehrzweckrechner weiterzuentwickeln. Das Design von ENIAC wurde dementsprechend ad hoc und während seiner Konstruktion festgelegt (vgl. Burks 1980; Eckert 1980; Mauchly 1980).

Als Resultat geriet ENIAC zum größten und kompliziertesten elektronischen Rechner, der je gebaut wurde. Die Architektur des Rechners orientierte sich noch an mechanischen Vorbildern und baute sich aus spezialisierten Funktionseinheiten auf, die parallel arbeiteten, dabei zum großen Teil analoge Rechengänge elektronisch simulierten und jeweils eigene und sehr unterschiedliche Speichermedien besaßen. Der modulare Aufbau und die inkrementellen An- und Umbauten im Zuge seiner Entwicklung machten aus ENIAC, der ursprünglich mit rund 5.000 Vakuumröhren bestückt werden sollte, schließlich einen stromverschlingenden Dinosaurier mit mehr als 18.000 Röhren, deren Leistungsaufnahme der kompletten Elektrizitätsproduktion eines damaligen Kraftwerks entsprach (Vorndran 1986: 89–93). Zum Kriegsgeschehen trug ENIAC nichts mehr bei, da sich aufgrund seines komplexen Aufbaus die Fertigstellung des Rechners mehrfach verzögerte und die Maschine von der US-Army erst 1946 übernommen werden konnte (Burks 1980).

Als das entscheidende Problem aber erwies sich die Programmierung von ENIAC, die durch den komplexen modularen Aufbau der Maschine zu einer mühseligen und langwierigen Angelegenheit wurde. Die unterschiedlichen Funktionseinheiten wurden wie bei der manuellen Fernsprechvermittlung durch Steckkontakte miteinander verbunden, die für eine Programmänderung immer wieder gelöst und neu konfiguriert werden mußten. Hierdurch

87 Wie sich erst im Rahmen eines Patentstreits zwischen den Firmen Sperry Univac und Honeywell Bull am Anfang der siebziger Jahre herausstellte, übernahm Mauchly die Idee für den Bau einer elektronischen Version des Differentialanalysators von John V. Atanasoff, dem die Priorität zukommt, in den Jahren 1935 bis 1941 am Iowa State College in Ames den weltweit ersten elektronischen Digitalrechner entwickelt zu haben. Atanasoffs Erfindung spielte für die Entwicklung der Rechentechnik indes keine weitere Rolle. Es handelte sich um eine Spezialmaschine zur Berechnung von Polynomen, von der nicht klar ist, ob sie je voll funktionstüchtig wurde, die aber in jedem Fall unbenutzt und unbeachtet blieb (Lévy 1994: 934–935).

entstand eine extreme Diskrepanz zwischen der Zeit, die für die Programmierung von ENIAC benötigt wurde, und dem Tempo, mit dem die Maschine die Rechenoperationen ausführte. Im Effekt machten die langen Einrichtzeiten des Rechners die Geschwindigkeitsvorteile der elektronischen Röhren wieder zunichte.⁸⁸

So wurde sehr schnell klar, daß die Entwicklung von ENIAC in eine Sackgasse geführt hatte. Eckert und Mauchly begannen bereits Ende 1943, Anfang 1944 mit der Konzeption einer neuen Maschine, die eine wesentlich einfachere Architektur besitzen und vor allem flexibler zu programmieren sein sollte. Seine früheren Arbeiten auf dem Gebiet der Radartechnik führten Eckert in dieser Situation dann zu einer Lösung, aus der sich plötzlich völlig neue Grundprinzipien für den Aufbau eines elektronischen Rechners ergaben (Eckert 1980).

Bevor Eckert seine Tätigkeit am ENIAC-Projekt aufnahm, hatte er für die US-Army den sogenannten Quecksilber-Verzögerungsschalter entwickelt, mit dessen Hilfe sich die Zeit bestimmen ließ, die Radarsignale für ihren Weg zu einem Objekt und zurück benötigten.⁸⁹ Wie sich nun herausstellte, ließ sich dieser Verzögerungsschalter auch für den Bau eines schnellen und variablen Schreib-Lese-Speichers verwenden, der die Leistungsfähigkeit des entsprechenden Speichers von ENIAC um mehr als den Faktor 100 übertraf und zudem wesentlich preiswerter zu realisieren war (Burks 1980: 337). Die Größe und Arbeitsgeschwindigkeit dieses variablen Speichers machten es jetzt möglich, das Design der geplanten neuen Maschine radikal zu vereinfachen und auf einen modularen Aufbau des Rechners mit parallel arbeitenden Funktionseinheiten zu verzichten. Unter der Bezeichnung EDVAC (Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer) wurde die neue Maschine jetzt als serieller Binärrechner mit einem einzigen, aber vergleichsweise großen Speicher ausgelegt.⁹⁰

Vor allem jedoch wurde es durch diesen Speicher überflüssig, für die Programmierung von EDVAC externe Medien wie Lochstreifen zu benut-

88 ENIAC entstand deshalb auch unmittelbar Konkurrenz durch einen elektromagnetischen Differentialanalysator, der 1944 am MIT entwickelt wurde. Dieser Rechner arbeitet zwar im Prinzip langsamer als ENIAC, war aber einfacher aufgebaut und deshalb leichter zu programmieren (Eckert 1980: 530).

89 Dies erlaubte es, die Geschwindigkeit eines vom Radar erfaßten Objekts zu bestimmen.

90 »Because EDVAC would be so much faster, smaller, and simpler than ENIAC, there was no longer the need for parallelism to gain speed, and it was decided to store numbers serially and to process them serially. The guiding principle of EDVAC was: One thing at a time, down to the last bit« (Burks 1980: 338).

zen. EDVAC konnte speicherintern programmiert werden. Der neue »High-Speed Read-Write Electronic Store« (Burks 1980: 335) verfügte über ausreichend Platz, um neben den Daten auch die Programme aufnehmen zu können. Dies hatte den Vorteil, daß sich die Maschine nicht nur sehr flexibel und vielseitig programmieren ließ, sondern auch sehr schnell war, da die Steuerung der Rechenprozesse jetzt mit derselben Geschwindigkeit ablief wie die Rechenoperationen selbst. Die Flexibilität und Arbeitsgeschwindigkeit von EDVAC übertraf damit alle bisherigen Konstruktionen bei weitem. Mit der speicherinternen Programmierung von EDVAC verfügte man jetzt aber nicht nur über einen schnellen und flexiblen, sondern tatsächlich auch über einen universellen Rechner. Aus technischen Gründen lag es beim Quecksilber-Verzögerungsschalter nahe, die gespeicherten Impulse mit Hilfe einer zweiten Röhre gesondert mitzuzählen.⁹¹ Damit allerdings war ein Speicher mit indizierten Feldern und wahlfreiem Zugriff (»random access memory«) entstanden, der die Berechnung und Abänderung von Adressen während des Programmablaufs erlaubte und allgemeine Rekursion ermöglichte. Doch »es stellte sich erst später heraus, daß dadurch eine universelle Maschine entstanden war« (Bauer 1991: 32).

Die potentielle Universalität der neuen Maschine blieb aber zunächst nicht nur Eckert und Mauchly, sondern auch John von Neumann verborgen, dem fälschlicherweise zugeschrieben wird, das technische und logische Design in seinem 1945 erschienenen »First Draft of a Report on the EDVAC« mit dem Ziel entworfen zu haben, eine konkrete Turingmaschine zu schaffen.⁹² Von Neumann hat aber weder das Design von EDVAC entworfen, noch war sein Interesse an diesem Rechner durch die Turingmaschine motiviert. Er kam mit dem EDVAC-Projekt an der Moore School vielmehr in seiner Funktion als Berater der amerikanischen Regierung und Leiter des Rechenlabors in Los Alamos in Berührung. Während des Zweiten Weltkrieges war er dort am Bau der Atombombe beteiligt und zählte zu den wenigen Wissenschaftlern, die Zugang zu den streng geheimen Rechnerprojekten in den USA hatten.⁹³ Als Berater des amerikanischen Verteidigungsministeriums

91 Die technischen Einzelheiten für die Notwendigkeit, eine zweite Röhre für die Speicherung eines Impulses verwenden zu müssen, beschreibt Burks (1980: 341).

92 So aber Mainzer: »Fest steht, daß von Neumann im »First Draft« nicht nur die EDVAC-Maschine (The Electronic Discrete Variable Arithmetic Computer) mit 100 X größerer interner Speicherkapazität entwirft, sondern auch Turings logische Idee eines universellen Automaten auf den technischen Begriff eines »very high speed automatic digital computing systems« zu bringen vermag« (Mainzer 1979: 129, 1994: 65).

93 Vgl. Hodges (1989: 345–351). Zu den Arbeiten von Neumanns in Los Alamos vgl. aus-

machte er sich Ende 1944, Anfang 1945 an der Moore School sowohl mit den Problemen von ENIAC als auch mit den Plänen von Eckert und Mauchly für den Bau von EDVAC vertraut (Eckert 1980: 532). Aus seinen Besuchen an der Moore School ging dann 1945 der berühmte »First Draft of a Report on the EDVAC« hervor, den er ohne das Wissen von Eckert und Mauchly und ohne die Entwickler von EDVAC namentlich zu nennen publizierte.

Dieser Report verbreitete sich in kürzester Zeit weltweit und wurde von jedem gelesen, der sich mit dem maschinellen Rechnen befaßte. Der »First Draft« hat von Neumann vor allem deshalb den Ruf als »Vater des modernen Computers« (Mahr 1984: 101) eingebracht, weil er dort die speicherinterne Programmierung von elektronischen Rechnern vorschlug. Wenn ihm schon nicht zugeschrieben wird, das technische und logische Design von EDVAC entwickelt zu haben, so gilt er doch zumindest als der erste, der dieses Prinzip formuliert hat (vgl. Burks 1980: 338–344).⁹⁴ Dagegen reklamieren Eckert und Mauchly die Idee der speicherinternen Programmierung für sich, ohne damit freilich an eine Universalmaschine zu denken. Eckert nennt das intern gespeicherte Programm eine »obvious idea, one that we started to take for granted« lange bevor von Neumann zu ihnen gestoßen sei, da sich nur so die Ablaufsteuerung an die Geschwindigkeit der Rechenoperationen angleichen ließ (Eckert 1980: 531).⁹⁵ Lévy zufolge handelt es sich bei von Neumanns »First Draft« ganz offensichtlich um »die Geschichte eines Raubzuges« und einen »Fall von Kaperei« (Lévy 1994: 915). Doch »dank der Desinformation, die einige Beteiligte betrieben« (Bauer 1991: 32), läßt sich diese Prioritätsfrage wohl nicht mehr klären.

Ungeachtet dieser Prioritätsfrage findet sich im »First Draft« aber auch an keiner Stelle ein Hinweis darauf, daß mit der speicherinternen Programmierung eine Universalmaschine gewonnen wäre. Die Möglichkeit, Adressen berechnen und abändern zu können, wird dort nirgendwo erwähnt: »In von Neumann's logical design paper, the First Draft, there was essentially nothing on programming or coding« (Goldstine 1972: 266).⁹⁶ Diese Mög-

führlicher Ulam (1980: 93–99).

94 Allerdings hat von Neumann selbst nach der Publikation des »First Draft« diese Idee niemals offiziell für sich beansprucht (vgl. Hurd 1980: 536).

95 Daß diese Idee denn auch ziemlich nahe lag, wenn man nur über einen ausreichend großen und schnellen elektronischen Speicher verfügte, zeigt sich auch am Beispiel der britischen Collossi. Unabhängig von von Neumann oder Eckert und Mauchly hatte auch Flowers Teile der Ablaufsteuerung in den Speicher der ansonsten nicht universellen Collossi verlegt (Bauer 1991: 32).

96 Wie Eckert und Mauchly hatte auch von Neumann zunächst nur das Ziel einer möglichst

lichkeit entdeckten von Neumann und seine Mitarbeiter erst während der Entwicklung des sogenannten IAS-Rechners. Von Neumann begann 1946 am Institute for Advanced Studies (IAS) in Princeton mit dem Nachbau von EDVAC, dem ersten Clone der Computergeschichte.⁹⁷ Mit der Entwicklung der ersten Programme für den IAS-Rechner wurde jetzt »peu à peu ausgesprochen, daß man mit Hilfe der Adressensubstitution eine Universalrechenmaschine gewonnen hatte« (ebd.: 32), und auch jetzt erst entdeckte man die Speicherorganisation von Universalrechnern als theoretisches Problem. So ging von Neumann am Ende der vierziger Jahre in seinen Arbeiten über Automatentheorie der Frage nach Alternativen zur logischen Architektur von EDVAC und dem einfachsten Modell der Universalmaschine nach (Goldstine 1972: 271–285).

Zur Möglichkeit der relativen Adressierung äußerte er sich erstmals in dem sogenannten Princeton-Berichten »Preliminary discussion of the logical design of an electronic computing instrument« von 1946 und »Planning and coding of problems for an electronic computing instrument« aus dem Jahr 1947 (Bauer 1991: 32). Aber auch Mauchly und anderen Computerpionieren wie Seeber, der dies bereits 1945 ins Auge faßte, blieb die Möglichkeit der Adressensubstitution nicht verborgen (Bauer 1991: 32). In seinem Papier »Preparation of Problems for EDVAC-type Machines« beschrieb Mauchly etwa zeitgleich zum Erscheinen der Princeton-Berichte ein entsprechendes Programm (Mauchly 1948a).

Dennoch waren es wieder von Neumanns Berichte, die auch jetzt die internationale Aufmerksamkeit auf sich zogen. Das Institute for Advanced Studies entwickelte sich als Folge des »First Draft« und der Princeton-Berichte regelrecht zu einem Mekka der Rechentechnik. Die Moore School konkurrierte nur kurze Zeit mit eigenen Vorlesungsreihen und Seminaren gegen von Neumanns Institut um die akademische Führungsrolle auf diesem Gebiet, die nach 1947 klar an Princeton ging (Ceruzzi 1989: 239–255).

Zugleich wurden von Neumanns Schriften gewissermaßen zu den Blaupausen zahlreicher Nachbauten der IAS-Maschine, mit denen sich dieser

großen Flexibilität und Geschwindigkeit der Ablaufsteuerung im Auge. Im »First Draft« empfiehlt er die speicherinterne Steuerung »wenn der Apparat flexibel sein soll« (von Neumann, zitiert nach Lévy 1994: 938).

97 Der einzige wesentliche Unterschied zur Maschine der Moore School bestand darin, daß von Neumann plante, statt der von Eckert eingesetzten Quecksilber-Verzögerungsschalter Kathodenstrahlröhren zu verwenden. Diese Röhren funktionierten aber nie zufriedenstellend. Der Bau der IAS-Rechner verzögerte sich und die Maschine wurde später auf der Basis einer alternativen Schalttechnik fertiggestellt (Burks 1980).

Rechner zum Vorbild des modernen Computers schlechthin entwickelte. Noch bevor EDVAC und der IAS-Rechner selbst fertiggestellt wurden, entstanden bereits zahlreiche Kopien der Kopie von EDVAC, der jetzt zunehmend unter der Bezeichnung Von-Neumann-Maschine firmierte. Einer der ersten Rechner, der weitgehend nach dem Vorbild der IAS-Maschine entwickelt wurde, war »Whirlwind«, eine ursprünglich als analoger Flugsimulator konzipierte Maschine, die das Massachusetts Institute of Technology (MIT) im Auftrag der US-Navy in den Jahren 1946 bis 1950 fertigstellte (Everett 1980: 365–384). Andere Beispiele waren etwa ORDVAC und ILLIAC, mit deren Bau am Ende der vierziger Jahre an der University of Illinois begonnen wurde (Robertson 1980: 247–364), SWAC (Standards Western Automatic Computer) und SEAC (Standards Eastern Automatic Computer) als Produkte des National Western beziehungsweise National Eastern Bureaus of Standards (Huskey 1990: 419–431; Slutz 1980: 471–477) sowie MANIAC, der etwa zur gleichen Zeit in Los Alamos entstand (Metropolis 1980: 457–464). In Großbritannien stellte Maurice V. Wilkes mit EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Computer) bereits 1949 nach dem Vorbild des im »First Draft« beschriebenen Designs von EDVAC an der Universität Cambridge den ersten funktionstüchtigen europäischen Universalrechner fertig (Wilkes 1980). Wilkes gewann mit seinen Programmen für EDSAC später großen Einfluß auf die Entwicklung der Programmiertechnik.

Nach dem Erscheinen des »First Draft« und der Princeton-Berichte befaßte sich dann auch Turing mit dem Bau eines elektronischen Digitalrechners. Dabei übernahm er ein Projekt des National Physical Laboratory, in dem es ursprünglich um die Entwicklung eines elektronischen Differentialanalysators nach dem Vorbild der Moore School ging. Als Reaktion auf den »First Draft« und die Princeton Berichte entschied sich das National Physical Laboratory aber 1946 für den Bau eines Rechners vom Typ EDVAC unter der von Turing gewählten Bezeichnung ACE (vgl. dazu ausführlich Hodges 1989: Kap. 6). In einem Vortrag von 1947, seiner »Lecture to the London Mathematical Society«, setzte er sich dann erstmals mit dem Problem der Speicherorganisation von Rechnern auseinander und erwähnte, daß »Maschinen wie die ACE als praktische Versionen« der Turingmaschine angesehen werden können, da man mit ihr über einen adressierbaren Speicher verfüge, »bei der jede gewünschte Eingabe unverzüglich erreicht werden kann«.⁹⁸

98 In diesem Vortrag deutete er nun auch seinen Artikel zum Hilbertschen Entscheidungsproblem zur theoretischen Vorarbeit für den Bau der ACE um: »Vor einigen Jahren

Wie von Neumann befaßte sich auch Turing mit Alternativen zum logischen Design von EDVAC. Die Entdeckung, daß es sehr viel einfachere Modelle der Universalmaschine als EDVAC gab, veranlaßte ihn zudem dazu, seine ACE als eine sogenannte oder »Minima« auszulegen, bei der anders als im Fall des Von-Neumann-Rechners bestimmte basale Funktionen nicht fest verdrahtet waren, sondern durch Programme realisiert wurden. Mit dieser Maschine trat er bewußt in Konkurrenz zu der Mehrheit der Computerpioniere, die sich am Vorbild von EDVAC und der IAS-Maschine orientierten. In einem 1947 erstellten Gutachten zu EDSAC, der britischen Kopie von EDVAC, die Wilkes in Cambridge entwickelte, bezeichnete er das logische Design des Von-Neumann-Rechners als »krassen Unsinn«, der der »amerikanischen Tradition« entspräche, »Schwierigkeiten mit Hilfe von viel Gerät und nicht durch Nachdenken zu lösen« (Turing, zitiert in: Hodges 1989: 405–406).

Turings Minima wurde 1950 unter der Bezeichnung Pilot ACE fertiggestellt und später von der Firma Feranti unter dem Namen Mark I als kommerzielles Produkt nachgebaut. Tatsächlich aber hatte das logische Design seines Rechners nie eine Chance, sich gegen das durchzusetzen, was laut Wilkes schon am Ende der vierziger Jahre »die Hauptströmung der Computerentwicklung zu werden versprach« (Wilkes, zitiert nach Hodges 1989: 407). Rechner mit alternativen Architekturen zur Von-Neumann-Maschine starben sehr bald aus und blieben nur von theoretischem Interesse.

In den USA entwickelte sich der Computer bereits am Ende der vierziger Jahre zu einem kommerziellen Produkt, das ab 1950 auf eine rasch wachsende militärische und nur kurze Zeit später ebenfalls schnell expandierende zivile Nachfrage stieß, in deren Folge sich das logische Design von EDVAC durch einen »Lock-in-Effekt« (Arthur 1989) als der bis heute gültige Industriestandard etablierte. Ausgelöst wurde dieser »Lock-in-Effekt« durch die Rechner der 1946 von Eckert und Mauchly gegründeten Electronic Control Computer Corporation, die im Auftrag der Northrop Aircraft Company mit BINAC (Binary Instruction Numeric Automatic Calculator) 1949 die erste kommerzielle Universalmaschine nach dem Vorbild von EDVAC fertigte (Ceruzzi 1989: 262). Dieser Maschine folgte dann UNIVAC (Universal Arithmetic Computer), der 1951 an das Bureau of Census der amerikanischen Regierung ausgeliefert und in der amerikanischen Öffentlichkeit zeit-

forschte ich darüber, was *jetzt* beschrieben werden könnte als Untersuchung der theoretischen Möglichkeiten und Grenzen digitaler Rechenmaschinen« (Turing 1987b [1947]: 186; Hervorh. d. Verf.).

weise zum Synonym für Computer wurde (ebd.: 262).⁹⁹ Ende der vierziger Jahre wurde das Unternehmen von Eckert und Mauchly von der Remington Rand Corporation übernommen, die Anfang der fünfziger Jahre eine beherrschende Position auf dem amerikanischen Computermarkt besaß (Mainzer 1979: 130).

Nach der Markteinführung von BINAC und UNIVAC wandten sich um 1950 elf weitere große Unternehmen wie IBM, RCA (Radio Corporation of America) Bendix oder General Electric dem Bau von Universalrechnern nach dem Vorbild des logischen Designs von EDVAC beziehungsweise der IAS-Maschine zu. In dieser Zeit zeichnete sich bereits ab, daß es als Folge der wachsenden militärischen Nachfrage nach Rechenkapazitäten nicht bei vereinzelt Bestellungen von solchen Rechnern bleiben würde (Hurd 1980). Die UdSSR hatte 1949 ihre erste Atombombe gezündet und leitete damit die Phase des Wettrüstens zwischen den beiden Supermächten ein. Präsident Truman kündigte noch im selben Jahr die Entwicklung der Wasserstoffbombe und zahlreiche weitere Großprojekte an, die den militärischen Bedarf an Rechenleistung schlagartig ansteigen ließen und in denen die Computertechnik von Anfang an einen zentralen Platz einnahm. Für die entstehende Computerindustrie kamen diese Projekte geradezu einer »healthy infusion« (Flamm 1988: 86) gleich, ohne die sie mit einiger Sicherheit nicht die große wirtschaftliche Bedeutung entfaltet hätte, die ihr am Ende der fünfziger Jahre in den USA bereits zukam. Die massive militärische Förderung der Computertechnik im Rahmen dieser Projekte lief auf eine Art Anschubfinanzierung des zivilen Computermarktes hinaus, und die Frage, ob dieser Markt ohne die Fördermittel des amerikanischen Verteidigungsministeriums so rasch expandiert wäre, läßt sich »with a fairly clear ›no«« (Flamm 1987: 18) beantworten.

Vor allem die IBM war an diesen militärischen Projekten in großem Maßstab beteiligt und konnte sich schon früh hohe Anteile an dem rasch expandierenden neuen Markt sichern. Das Unternehmen besaß dabei von Beginn an einen wichtigen Startvorteil, da ihm seine führende Position in der Lochkartentechnik jetzt zu einem Vorsprung im Bereich der Ein- und Ausgabegeräte für Computer verhalf. IBM begann 1950 mit dem Bau eines großen »defense calculator« unter der Bezeichnung System 701 (Hurd 1980:

⁹⁹ Der Grund hierfür war, daß es mit Hilfe dieses Rechners im Jahr 1952 gelang, den Sieg von Dwight Eisenhower über Adlai Stevenson bei den amerikanischen Präsidentschaftswahlen mit nur wenigen Prozent Abweichung vorauszusagen (Ceruzzi 1986: 190). UNIVAC machte damit den Begriff vom »elektronischen Gehirn« populär.

405), der das logische Design von EDVAC beziehungsweise des IAS-Computers besaß, und an dessen Entwicklung von Neumann als Berater maßgeblich beteiligt war (ebd.: 401–402). Alle späteren militärischen und kommerziellen Maschinen, die IBM entwickelte, waren gleich welcher Schaltungstechnologie in ihrer logischen Organisation unmittelbare Nachkommen des Systems 701.

Mit der 701 begann sowohl der kommerzielle Siegeszug des Computers als auch der Aufstieg der IBM zum weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet der Computertechnik. Die 701 avancierte in den fünfziger Jahren gewissermaßen zum Arbeitspferd der militärischen Forschung und Entwicklung in den USA, und die Höhe der Nachfrage nach diesem Computer überraschte selbst die IBM. In einer internen Prognose über die Absatzchancen der 701 ging das Unternehmen davon aus, daß ein Bedarf an rund fünfundzwanzig solcher Maschinen bestünde. Tatsächlich wurde der Rechner in nur wenigen Jahren über zweihundertmal geordert (Ceruzzi 1986: 190; Flamm 1988: 81). Aber auch die Wachstumsdynamik des schon bald entstehenden zivilen Computermarkts in den USA übertraf Erwartungen der Hersteller bei weitem. Das kurze Zeit später vorgestellte, relativ kleine und von der 701 abgeleitete System 650 wurde zu einem noch sehr viel größeren Erfolg. IBMs Verkaufsprognose ging diesmal von rund zweihundertfünfzig Maschinen aus. Das System 650 entwickelte sich jedoch geradezu zum »Modell T« der Computerindustrie und wurde bis zum Jahr 1955 etwa eintausendmal ausgeliefert (Ceruzzi 1986: 191). Mit rund dreitausend installierten Rechnern insgesamt (Heintz 1993: 230, Fußnote 30) war bereits um 1955 in den USA eine neue und stark expandierende Industrie entstanden (Flamm 1988: 80–83).

Kapitel 5

Entstehung der Informatik

5.1 Numerik, Kybernetik und frühe Computer science

Sowenig wie der Computer gezielt konzipiert worden ist, sowenig wurde unmittelbar nach seiner Entdeckung mit der Entwicklung von formalen Modellen der Programmierung und formalen Sprachen begonnen. Auch die Entstehung der Informatik selbst fügt sich nicht dem Kuhnschen Modell der wissenschaftlichen Entwicklung. Soweit es zu vereinzelt Versuchen kam, höhere Programmiersprachen zu entwickeln, blieben sie unbeachtet und folgenlos. Mit Entdeckung der Universalmaschine endete die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Programmierung auch vorläufig. In der Mathematik und Elektronik interessierte man sich schlicht für diese Frage nicht, und die Computerpioniere selbst haben »keine Spuren auf dem Gebiet der Programmierung hinterlassen« (Bauer 1974: 333). Auch von Neumann oder Turing, die gemeinhin als »Begründer« der Informatik gelten, haben die neue Maschine keineswegs als »Baustein zum Aufbau des theoretischen Kerns einer neuen Wissenschaft« begriffen (Mainzer 1979: 132).¹⁰⁰

Soweit man im Hinblick auf die späten vierziger und frühen fünfziger Jahre überhaupt von einer Computer science sprechen kann, spaltete sich dieses Feld in eine weitgehend theorielose Praxis der Programmierung und eine hoch spekulative theoretische Diskussion in der Kybernetik und frühen Künstlichen-Intelligenz-Forschung (KI-Forschung) auf. Der Computer erwies sich von Beginn an als ein überaus multivalentes Phänomen, das zu stark divergierenden Auffassungen darüber führte, zu welchen Zwecken es sich einsetzen ließ und wie es theoretisch und methodisch zu behandeln war.

100 Auch Knuth und Pardo (1980: 213) konstatieren in diesem Zusammenhang: »In fact the most surprising thing is that an algebraic language ... was not developed first at the mathematically oriented centers of computer activity.«

Der ganz überwiegende Teil der Mathematiker, darunter auch von Neumann, betrachtete den Computer nach wie vor im wesentlichen als ein numerisches Recheninstrument und setzten ihn hauptsächlich dazu ein, wozu er ursprünglich entwickelt worden war: als Ersatz für die Handkurbelmaschinen. »The computer pioneers understood the concept of the computer as a general purpose machine, but only in the narrow sense of its ability to solve a wide range of mathematical problems« (Ceruzzi 1986: 197). Ähnlich wie die Konstrukteure der ersten Automobile ihre Entwicklungen als »horseless carriage« (ebd.: 194) deuteten, blieb der Computer in ihrer Wahrnehmung buchstäblich ein Rechengerät, dessen praktische Anwendungsmöglichkeiten sich im wesentlichen auf die Numerik beschränkten.

Dementsprechend gingen sie auch noch am Beginn der fünfziger Jahre davon aus, daß nur ein geringer Bedarf an den neuen Rechnern bestand. Howard Aiken war der Ansicht: »There will never be enough problems, not enough work, for more than one or two of these computers« (zitiert nach Flamm 1988: 48).¹⁰¹ Ähnlich sahen dies die Computerpioniere in England: »We have a computer here in Cambridge; there is one in Manchester and one at the NPL. I suppose there ought to be one in Scotland, but that's about all« (D.R. Hartree, zitiert nach Ceruzzi 1986: 190). Daher gingen die Fehleinschätzungen der Computerindustrie hinsichtlich der Nachfrage nach den neuen Rechnern darauf zurück, daß sie sich zunächst an den Prognosen der Computerpioniere orientierte: »Scientists controlled the early development of the computer, and they steered postwar computing projects away from machines and applications that might have a mass market« (ebd.: 192).

Aus einer Perspektive, die den Computer hauptsächlich als ein numerisches Rechengerät erscheinen ließ, gerieten auch höhere Programmiersprachen und formale Modelle der Programmierung nicht ins Blickfeld. Bei der Programmierung der numerischen Berechnungen gab man sich vielmehr mit pragmatischen Problemlösungen und Programmierwerkzeugen zufrieden, die später mit dem Sammelnamen Assemblersprachen bezeichnet wurden (Sammet 1969). Dies waren keine Sprachen mit einer definierten Syntax und Semantik, sondern symbolische, mnemotechnische Ausdrücke, die den anfänglich benutzten und äußerst schwer zu handhabenden Binär- oder Hexa-

101 Noch 1956 äußerte er sich angesichts des einsetzenden kommerziellen Siegeszugs des Computers verwundert: »If it should ever turn out that the basic logics of a machine designed for 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« (zitiert nach Ceruzzi 1986: 197).

dezimalcode ersetzen. Die Assemblersprachen waren maschinenabhängige Werkzeuge, die sich aus Unterprogrammen oder Subroutinen zusammensetzten und es überflüssig machten, häufig wiederkehrende Aufgaben stets neu programmieren zu müssen. Ein bestimmter Befehl ließ sich bei Bedarf durch ein entsprechendes Symbol aufrufen, und ein Programm als Abfolge solcher Symbole darstellen.¹⁰² Solange es sich um sehr kleine und einfache Programme handelte, ließen sich mit den Assemblersprachen zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Größere Programme, wie sie schon sehr bald in der militärischen und kommerziellen Programmierung entstanden, führten aber rasch zu einem äußerst komplexen, unübersichtlichen und fehleranfälligen Code.

Auch von Neumanns Beiträge zur Programmierung gingen nicht über die Assemblertechnik hinaus, und obwohl er nicht einmal diese Technik weit vorangetrieben hat, setzte sich zu ihrer Bezeichnung später der Begriff des Von-Neumann-Stils der Programmierung durch.¹⁰³ Von Neumann nutzte den IAS-Computer ebenfalls hauptsächlich für numerische Anwendungen und führte in Princeton seine früheren Arbeiten über Hydrodynamik fort. Darüber hinaus arbeitete er wie viele andere Mathematiker zu dieser Zeit auf dem verwandten Gebiet der numerischen Meteorologie und an Berechnungsverfahren zur Wetterprognose. Dieses Forschungsgebiet war in den zwanziger Jahren aufgegeben worden, da es sich als unmöglich erwies, »to advance the computations faster than the weather advances« (Goldstine 1972: 302), und erlebte als Folge der schnellen elektronischen Rechner jetzt einen großen Aufschwung.¹⁰⁴ Zur Programmierung der IAS-Maschine verwendete man am Institute for Advanced Studies Flußdiagramme, die den Programmablauf abbildeten und von Hilfskräften »per Hand« in die Maschinensprache umgesetzt werden mußten. Daß dies auch in einer höheren Programmiersprache erfolgen konnte, die vom Rechner selbsttätig in die di-

102 Zur Veranschaulichung hier das imaginäre Beispiel von Sammet: Der Befehl »Lade den Inhalt des Speicherplatzes 64 in das Rechenwerk«, der in der binären Maschinensprache etwa die Form »011011 000000 000000 000000 000000 000001 000000« hat, könnte in der symbolischen Anweisung einer Assemblersprache zum Beispiel »CLA 0 0 0 0 64« lauten (Sammet 1969: 2).

103 Die Zuschreibungen, die um von Neumanns Beiträge zur Entwicklung des Computers und der Programmierung ranken, sind damit geradezu ein Paradebeispiel für den »Matthäus-Effekt in der Wissenschaft« (Merton 1985).

104 Etwa ab der Mitte der fünfziger Jahre konnte die numerische Meteorologie dann allmählich mit verlässlicheren Prognosen aufwarten, als die synoptischen Vorhersagen, die auf der Beobachtung von Wetterphänomenen und empirischem Wissen über typische Wetterkonstellationen beruhten (Goldstine 1972: 300–305).

gitale Maschinensprache übersetzt werden konnte, scheint von Neumann verschlossen geblieben zu sein. »Von Neumann did not see that the outcome of a computer programm could be, rather than numerical information, another programm« (Ceruzzi 1986: 199).

Zur Verbreitung der Assemblerprogrammierung trugen aber vor allem die Veröffentlichungen von Maurice Wilkes, wie etwa sein Bericht »The preparation of Programms for an Electronic Digital Computer«, bei, der 1951 aus dem EDSAC-Projekt in Cambridge hervorging (vgl. Wilkes 1980: 497–501). Wilkes Beiträge setzten sich nicht mit theoretischen Problemen und formalen Methoden der Programmierung auseinander, sondern liefen auf eine hoch elaborierte »Trickologie« der Programmierung hinaus, die ihn in den fünfziger Jahren regelrecht zu einem internationalen »Star« auf diesem Gebiet werden ließen (Hodges 1989: 431–433).

Turing kritisierte zwar bereits früh die theoretischen und formalen Mängel der Programmieretechnik seines Konkurrenten Wilkes, indem er auf die unmathematische Notation und fehlende logische Struktur der Assemblersprachen verwies, andererseits trug er selbst ebenfalls so gut wie nichts zur Entwicklung der Programmierung bei. Er zog sich bereits am Ende der vierziger Jahre mehr und mehr aus dem Bereich der praktischen Anwendungen des Computers zurück und wandte sich hauptsächlich der KI-Forschung und der Frage zu, ob Maschinen denken können. Die anfänglich ins Auge gefaßte Entwicklung eines »short codes« für die ACE nahm Turing nie in Angriff. Die wenigen kleinen Programme, die er für die ACE entwarf, schrieb er direkt im Maschinencode und damit in einer sehr »primitiven Form der Kodierung« (ebd.: 460).¹⁰⁵ Auch seine Idee der Programmverifikation, die er 1949 in dem Vortrag »Cheking a Large Routine« entwickelte, hat weder er selbst noch jemand anders weiterverfolgt. Über die ihn faszinierende Frage, ob Maschinen denken können, »hatte er das Interesse an dieser Art von Arbeit verloren« (ebd.: 460).¹⁰⁶

Soweit in den späten vierziger und frühen fünfziger Jahren Versuche zur Entwicklung von höheren Programmiersprachen unternommen wurden, geschah dies nicht im Rahmen einer systematischen, koordinierten und kumulativen Forschung, sondern in verstreuten und voneinander unabhängigen

105 Auch das von ihm 1951 verfaßte »Programmer's Handbook« für die ACE hatte »nur wenig neue Ideen aufzuweisen« (Hodges 1989: 461).

106 »Zahlreiche Möglichkeiten eröffneten sich ihm, und daß er sie vernachlässigte war sehr verblüffend« (Hodges 1989: 462). »Aber mit wenigen Ausnahmen ... gab er diese Entwicklungslinie auf« (ebd.: 463).

Projekten einzelner Forscher oder kleiner Forschergruppen, die keine wissenschaftlichen Gemeinschaft bildeten, sondern »invisible colleges« (Crane 1972) entsprachen.¹⁰⁷ Knuth und Pardo (1980) haben diese frühen Versuche rekonstruiert und listen insgesamt achtzehn verschiedene Sprachentwürfe auf. All diese Entwürfe blieben in explorativen Ansätzen stecken, wurden nur in seltenen Fällen auf einem Rechner implementiert und meist nicht einmal veröffentlicht. Außerdem wiesen sie große theoretische und konzeptionelle Divergenzen auf und teilten im Prinzip nur die Idee, daß es möglich sein mußte, die mathematische Formelsprache von den Rechnern mit Hilfe spezieller Übersetzungsprogramme, die später die Bezeichnung Compiler erhielten, selbsttätig in den Maschinencode transformieren zu lassen. Vorerst aber war die Idee des »automatic programming« (Knuth/Pardo 1980), wie die Codierung von Anweisungen mit Hilfe höherer Sprachen anfänglich genannt wurde, nur eine Angelegenheit weniger Enthusiasten, deren Entwürfe zudem weitgehend unbeachtet blieben.

Geradezu paradigmatisch hierfür stand der Plankalkül von Konrad Zuse als die weltweit erste höhere Programmiersprache. Zuse hatte diese Sprache in den Jahren 1945/46 zu einem Buchmanuskript ausgearbeitet und 1948 im »Archiv der Mathematik« einen Aufsatz über den Plankalkül publiziert. Er stieß jedoch weder mit seinen Aufsatz noch mit mehreren Vorträgen über seine Programmiersprache bei der Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GaMM) auf Resonanz. Zu dieser Zeit richteten sich alle Blicke auf das Institute for Advanced Studies in Princeton, das mit seinen Berichten auch die Aufmerksamkeit der deutschen Computerpioniere absorbierte. »Die Sache verpuffte« (Zuse 1970: 106), und Zuses Manuskript über den Plankalkül blieb unveröffentlicht. Eine wissenschaftliche Lehre von der Programmierung war damit am Ende der vierziger, Anfang der fünfziger Jahre nicht in Sicht, und das, was man allmählich als Computer science zu bezeichnen begann, noch ein lose zusammenhängendes Amalgamat aus Elektronik, Schaltalgebra, Automatentheorie, Assemblertechnik und numerischer Mathematik (Bauer 1974; Ceruzzi 1985).

Soweit sich die frühe Computer science theoretisch mit der neuen Maschine auseinandersetzte, geschah dies in hoch spekulativer Weise in der Kybernetik und sogenannten »harten« oder auch »theoretischen« KI-Forschung. Bis zu ihrem Niedergang am Ende der sechziger Jahre fungierte der Computer dort als eine »flexible Projektionsfläche« (Coy 1993: 44) für

107 Ähnlich wie dies Petra Ahrweiler zufolge später für die KI-Forschung in den siebziger Jahren galt (Ahrweiler 1995a).

Mensch/Maschine-Analogien, die dem »Faszinosum der Künstliche Intelligenz« (Ahrweiler 1995a: 8) anhängen.¹⁰⁸ In der Kybernetik glaubte man mit dem Prinzip der positiven Rückkoppelung den Schlüssel für das Verständnis der Steuerung und Regelung von maschinellen, biologischen, psychischen, ökonomischen und sozialen Prozessen bis hin zu Volkswirtschaften und der Gesellschaft als Ganzer in der Hand zu halten. Diese Ansicht vertrat vor allem Norbert Wiener in seiner erstmals 1949 erschienenen Schrift »Mensch und Menschmaschine« (Wiener 1952). Wiener hatte sich vor dem Zweiten Weltkrieg mit Rückkoppelungsprozessen in Telefonnetzen und während des Krieges mit der Entwicklung von elektronischen, durch »feed-back-loops« gesteuerte Servomechanismen für Feuerleitwerke befaßt. Seine Arbeiten über Rückkoppelungsprozesse verband er 1943 mit dem Neuronenmodell von McCulloch und Pitts, die in ihrem Aufsatz »A Logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity« eine Schaltalegebra der Nervenbahnen entwickelt hatten (McCulloch/Pitts 1943).

Obwohl das schaltalegebraische Neuronenmodell von McCulloch und Pitts in der Neurophysiologie von Beginn an hoch umstritten war und sehr bald widerlegt wurde (Zemanek 1991: 64), stützte sich die Kybernetik und die frühe KI-Forschung bis weit in die sechziger Jahre mehr oder minder explizit auf die mit ihm verbundene Vorstellung von der logischen Organisation des menschlichen Gehirns und der menschlichen Kognitionsprozesse. Da Maschinen vom Typ EDVAC selbsttätig rekursive Schleifen ausführen konnten, nahm Wiener und mit ihm lange Zeit auch die gesamte Kybernetik an, daß man mit dem Computer über ein Maschinenmodell verfügte, das sich analog zu den Denkprozessen und Lernvorgängen des menschlichen Gehirns verhielt. Für Wiener stand fest, »daß die Arbeitsweise des lebenden Individuums und die einiger neuerer Kommunikationsmaschinen völlig parallel verlaufen« (Wiener 1952: 26). In seinen Schriften propagierte er die

108 Mit dem Phänomen der KI-Forschung beginnt sich die Wissenschaftssoziologie erst derzeit intensiver auseinanderzusetzen. Bei den Studien von McCorduck (1987), Turkle (1984) und Gardner (1985) handelt es sich noch durchweg um Untersuchungen, die nur das Konzept selbst, aber nicht seine Entstehungsbedingungen darstellen. Ähnliches gilt auch für die historischen Arbeiten von Schopmann (1987) und Bloomfield (1987). Heintz (1993a) versucht neuerdings, die KI-Forschung in die Nähe des beweistheoretischen Programms der Mathematik zu rücken, setzt damit aber lediglich auf kognitive Ähnlichkeiten zwischen den beiden Ansätzen ab. Über die sozialen Entstehungsbedingungen und Stabilisierungsprozesse dieses hoch spekulativen Ansatzes ist bislang wenig bekannt. Die wissenschaftlichen und sozialen Bedingungen für seine Renaissance im Verlauf der achtziger Jahre sind dagegen jetzt umfassend dokumentiert bei Ahrweiler (1995a).

Kybernetik als eine neue Super- und Universalwissenschaft, die prinzipiell alle Forschungsfelder umfassen und integrieren sollte. Um sein Programm wurde es am Ende der sechziger Jahre still, bis dahin aber hat es nicht nur die innerwissenschaftliche Diskussion stark beeinflusst, sondern auch wie kaum je ein anderes Forschungsprogramm eine populärwissenschaftliche Wirkung entfaltet.

Wieners Schriften bereiteten auch den Nährboden für die »harte« oder »theoretische« KI-Forschung, deren Beginn üblicherweise auf die berühmte Dartmouth-Konferenz von 1956 datiert wird, auf der John McCarthy den Begriff der »Artificial Intelligence« prägte (Heintz 1993a: 261). Turing war einer der ersten Verfechter dieses Forschungszweiges. Sein 1950 veröffentlichter Aufsatz »Computing Machinery and Intelligence« zählte zu den frühesten Schriften der KI-Forschung und hat die Diskussion auf der Dartmouth-Konferenz stark beeinflusst.¹⁰⁹ Turing vertrat darin die Ansicht, daß es möglich war, Computer zu intelligentem Verhalten zu »erziehen«, und daß sich dieser Erziehungsprozeß »wie das normale Unterrichten eines Kindes vollziehen« konnte (Turing 1987c [1950]: 182).¹¹⁰ Diese Ansicht teilten auch die Teilnehmer der Dartmouth-Konferenz, die den Beweis für ihre Behauptung durch ein heuristisches psychologisches Forschungsprogramm zur Simulation menschlicher Kognitionsprozesse anzutreten suchten. Für diesen Ansatz stand vor allem die Gruppe um Herbert A. Simon, der zusammen mit Allen Newell 1958 die Botschaft ausgab: »Es gibt nunmehr in der Welt Ma-

109 Der 1950 in Mind erschienene Artikel »Computing Machinery and Intelligence« beruhte im wesentlichen auf dem gleichen Gedankengut wie seine bereits 1948 verfaßte Schrift »Intelligent Machinery. A Heretical Theory«. Die Veröffentlichung dieser Schrift wurde aber vom National Physical Laboratory unterbunden. Sie erschien erst 1959, rund fünf Jahre nach Turings Tod (Hodges 1989: 448).

110 Berühmt wurde der Artikel auch aufgrund des sogenannten Imitationsspiels, das auch als Turing-Test in die Literatur einging. Bei diesem Imitationsspiel ist eine Testperson über Fernschreiber mit einem Computersystem und einer anderen Person verbunden. Gelingt es der Testperson nicht, durch beliebige Fragen in einem bestimmten Zeitraum zu identifizieren, welcher Fernschreiber mit dem Computer und welcher mit der anderen Person verbunden ist, muß die Maschine als intelligent bezeichnet werden. Turing zufolge bedurfte es nur entsprechend großer Rechenkapazitäten, um die Maschinen »das Imitationsspiel so vollendet spielen« zu lassen, daß man »von denkenden Maschinen reden kann« (Turing 1987c [1950]: 160). In der KI-Forschung spielte der Turing-Test lange Zeit eine wichtige Rolle. Dort wurden auch zahlreiche Programme wie etwa ELISA für das Imitationsspiel entworfen. Was dieses Spiel aber über die Kognitionsfähigkeit von Maschinen aussagen soll, ist mehr als unklar. Auch wenn ein Programm durch die geschickte Eingabe-Ausgabe-Verarbeitung von Daten eine Testperson zu täuschen vermag, »verstehst« es doch seine Ein- und Ausgaben nicht. Vgl. dazu auch das »chinesische Zimmer« von Searle (1990).

schinen, die denken, lernen, schöpferisch tätig sind« (Newell/Simon 1958, zitiert nach Rechenberg 1991: 283).

Simon und seine Gruppe begannen in den späten fünfziger Jahren mit der Entwicklung von Dame- und Schachprogrammen und konzipierten dann in einer Verallgemeinerung ihres Ansatzes in den frühen sechziger Jahren den sogenannten »general-problem-solver« (Mainzer 1994: 116). Die Idee, daß sich zur Simulation des menschlichen Denkens und für den Nachweis maschineller Intelligenz abstrakte Tätigkeiten wie das Schachspielen am besten eigneten, ging ebenfalls auf Turing zurück. Dieser Idee lag die Annahme zugrunde, daß es sich beim Schachspielen um eine besonders komplexe Form der Wahrnehmung handeln müsse, da dieses Spiel hohe Konzentration erfordert, während andere Kognitionsprozesse wie etwa das Sehen »mühe-los« erfolgen (McNeill/Freiberger 1994: 300).

Mit ihrem Vorhaben, Kognitionsprozesse auf dem Computer zu simulieren, setzte sich die KI-Forschung schon in der Mitte der fünfziger Jahre der Kritik aus, daß sie mit einem völlig ungeklärten Konzept von Intelligenz arbeitete und Kognitionsprozesse schlicht mit logischem Schließen gleichsetzte, während mit dem menschlichen Denken und Problemlösungshandeln untrennbar verbundene Begriffe wie Kreativität oder Intuition in ihrem Vokabular nicht vorkamen. Dies war auch der Einwand von Neumanns, der sich in »The Computer and the Brain« (1960) gegen die Vorstellung wandte, daß Maschinen jemals dazu in der Lage sein würden, denken zu können.¹¹¹ Wie von Neumann betrachtete der überwiegende Teil der Computerpioniere und frühen Computerwissenschaftler die KI-Forschung mit Skepsis bis Ablehnung (Feigenbaum/Feldmann 1963). Dennoch blieb die Kritik an diesem Forschungszweig verhalten. Beide Seiten standen sich weitgehend indifferent gegenüber und schenkten ihren jeweiligen Aktivitäten und Entwicklungen wenig Beachtung.¹¹² Die KI-Forschung der fünfziger und sechziger Jahre blieb auf eine relativ kleine Gemeinschaft von frühen Computerwissenschaftlern beschränkt, die sich so gut wie ausschließlich durch militärische Forschungsgelder finanzierte, und hat die Entwicklung der zivilen Softwaretechnik kaum beeinflusst.

111 Zur Kritik an der KI-Forschung vgl. auch Weizenbaum (1978), Dreyfus (1988), Roszak (1986).

112 So auch Friedrich L. Bauer, einer der »Väter« der deutschen Informatik. Soweit es die formalwissenschaftlich orientierte Programmierung angeht, wurden dort Methoden, Algorithmen oder Programme aus der KI-Forschung übernommen, wenn sich dies anbot. Ansonsten aber nahm man sich wechselseitig kaum zur Kenntnis (Interview II).

Die euphorische Stimmung, mit der dieser Forschungszweig zunächst aufbrach, machte dann aber bald einer tiefen Ernüchterung Platz. Die Suche nach allgemeinen Problemlösungsprinzipien erwies sich als weitgehend erfolglos, und die Leistungsfähigkeit der Simulationsverfahren blieb weit hinter den Erwartungen zurück. Wie die Dame- und Schachprogramme der KI-Forschung hatte auch der von Simon entwickelte »general-problem-solver« mit menschlichen Intelligenzleistungen wenig gemein. Was das Denken simulieren sollte, waren nicht mehr als automatische Suchverfahren in den Zweigen von hierarchischen Entscheidungsbäumen, die nach der »Methode der rohen Kraft« (Rechenberg 1991: 240) arbeiteten und alle möglichen Lösungsvarianten sklavisch durchrechneten. Selbst aus den eigenen Reihen setzte sich die KI-Forschung damit dem Vorwurf aus, maschinelle Intelligenz nur vorzutäuschen und »durch ad-hoc-Lösungen von geschickt gewählten Problemen« lediglich »die Illusion komplexer Denkarbeit [zu] suggerieren« (Minsky 1968: 68). Auch die Leistungsfähigkeit der KI-Programme war ernüchternd. Simons »general-problem-solver« konnte »nur ziemlich unwichtige Probleme speziellen Charakters lösen« (Mainzer 1994: 117).

Ende der sechziger Jahre teilte die KI-Forschung dann das Schicksal der Kybernetik. Das Projekt der »denkenden Maschine« und das heuristisch-psychologische Forschungsprogramm zur Simulation menschlicher Kognitionsprozesse wurden nach und nach aufgegeben. Innerhalb der KI-Forschung wandte man sich jetzt zunehmend spezialisierten Programmen zur Verarbeitung von speziellem Wissen zu, während es zugleich um diesen Forschungszweig vorübergehend still wurde. Ende der siebziger Jahre erlebte dieser Forschungszweig in Form der »weichen« oder auch »praktischen« KI-Forschung und Expertensystemtechnik eine Renaissance, die dann am Ende der achtziger Jahre erneut in sich zusammenfiel (Ahrweiler 1995a, 1995b).¹¹³

113 Obwohl die spätere »weiche« Variante wesentlich weniger ehrgeizige Ziele verfolgte als die frühe »harte« KI-Forschung, hielt dies Marvin L. Minsky als einen ihrer prominentesten Verfechter nicht von der Prognose ab: »Innerhalb von drei bis acht Jahren werden wir eine Maschine mit der allgemeinen Intelligenz eines durchschnittlich begabten Menschen haben. Ich meine eine Maschine, die Shakespeare lesen, ein Auto wachsen, Geschäftspolitik betreiben, Witze erzählen und streiten kann. Zu diesem Zeitpunkt wird die Maschine anfangen, sich mit phantastischer Schnelligkeit selbst zu bilden. Nach ein paar Monaten wird sie auf dem Stand eines Genies sein und noch ein paar Monate später wird ihre Macht nicht mehr zu kalkulieren sein« (Minsky 1970, zitiert nach Rechenberg 1991: 238).

Aus der Phase der »harten« oder »theoretischen« KI-Forschung ging im wesentlichen nur die Programmiersprache LISP (List Processing Language) hervor. LISP war als ein Nebenprodukt dieses Forschungszweiges entstanden und von McCarthy speziell für das Sortieren von Listen und für Zwecke des automatischen Beweisens entwickelt worden. Die Sprache führte jedoch lange Zeit ein Schattendasein. Für praktische Zwecke war sie in ihrer ursprünglichen Form weitgehend ungeeignet und auf die Entwicklung der wissenschaftlichen Programmierung und höheren Programmiersprachen nahm sie kaum einen Einfluß (Sammet 1969). LISP wurde erst im Verlauf der siebziger Jahre als Werkzeug der »weichen« KI-Forschung wiederentdeckt.

Mit dem Niedergang der Kybernetik und KI-Forschung scheiterte auch der Versuch, die Computer science als eine experimentell-empirische Wissenschaft zu begründen. Diese Position vertrat entsprechend ihrem heuristischen Forschungsprogramm wiederum vor allem die Gruppe um Herbert Simon (Newell/Perlis/Simon 1967). Simon und seinen Kollegen zufolge war die Computer science ein Forschungsgebiet, das sich dem systematischen Studium empirischer Phänomene widmete. So wie die Entwicklung der Pflanzenwelt Gegenstand der Botanik war, bildete das Verhalten von Programmen unter unterschiedlichen Umweltbedingungen den Gegenstand der Computer science (ebd.: 1373–1374). In seiner erstmals 1969 erschienenen Monographie über die »Sciences of the Artificial« vertrat Simon die Auffassung, daß uns nichts davon abhielte, eine »natural history« der Computer zu schreiben: »We can study them as we would rabbits or chipmunks and discover how they behave under different patterns of environmental stimulation« (Simon 1981: 24).

Dieses heuristisch-experimentelle Programm verlor aber angesichts der ausbleibenden Erfolge der KI-Forschung in der zweiten Hälfte der sechziger Jahren zunehmend an Einfluß auf die kognitive Agenda der Computer science. Gleichzeitig zum Niedergang der Kybernetik und harten KI-Forschung kristallisierte sich vielmehr ein neues Verständnis der Computer science heraus, die jetzt mehr und mehr als eine formale Strukturwissenschaft von den Algorithmen und präskriptive Ingenieurdisziplin verstanden wurde. Diese formalwissenschaftliche Deutung der Computer science entwickelte sich parallel zu den immer umfangreicheren praktischen Anwendungen des Computers im militärischen und kommerziellen Bereich und als Reaktion auf die wachsenden technischen und wirtschaftlichen Probleme, in die sich die Programmierung dort verstrickte.

5.2 Der Kalte Krieg und die Softwaretechnik

So wie der zivile Massenmarkt für Computer in den USA erst durch die militärische Nachfrage entstand, ist auch die kommerzielle Softwareentwicklung erst durch die militärischen Nachkriegsprojekte der amerikanischen Regierung induziert worden. Die moderne Softwaretechnik ist ein genuines Kind des Kalten Krieges und hätte sich ohne die Milliardenbeträge, die in den fünfziger und sechziger Jahren in die Großprojekte des Department of Defense (DoD) flossen, mit Sicherheit sehr viel langsamer entwickelt. Die Computerhersteller selbst maßen der Software anfänglich keine wirtschaftliche Bedeutung zu und betrachteten die Programmierung der Maschinen als eine genuine Angelegenheit der Anwender. Dies änderte sich erst im Zuge der militärischen Projekte, die industriepolitisch auf eine immense Subventionierung des zivilen Softwaremarkts hinausliefen und damit zugleich einen kombinierten Angebotsdruck und Nachfragesog auf diesem Markt erzeugten.

Eines der sowohl für die Hardware- wie für die Softwaretechnik wichtigsten Projekte war in diesem Zusammenhang die Entwicklung des Flugüberwachungssystems SAGE (Semi Automatic Ground Environment). SAGE war eines der größten und ehrgeizigsten Projekte des DoD (Flamm 1987). Die Arbeit an dem Flugüberwachungssystem begann 1952, in Dienst gestellt wurde es erstmals am Beginn der sechziger Jahre.¹¹⁴ Diesem System folgten, ausgelöst vor allem durch den »Sputnikschock«¹¹⁵ am Ende der fünfziger und in den sechziger Jahren, dann viele weitere militärische Projekte ähnlicher Art wie zum Beispiel NORAD (North American Air Defense System) oder MIDAS (Missile Defense Alarm System).¹¹⁶ Standen bei der Entwicklung von SAGE anfänglich noch Probleme der Hardware im Vordergrund, so floß im Verlauf des Projekts ein ständig wachsender Anteil der Fördermittel in die Programmierung und Entwicklung von Software.

Die Förderung der Softwaretechnik nahm damit in den fünfziger und sechziger Jahren finanzielle Dimensionen an, die anderen Großprojekten,

114 Und damit genau zu einem Zeitpunkt als es bereits überholt war. Die UdSSR stellte ihre ersten Interkontinentalraketen in den frühen sechziger Jahren auf. Hierdurch wurde die Überwachung von Bomberbewegungen als der Hauptfunktion von SAGE ein nachrangiges Problem.

115 Am 4. Oktober 1957 schoß die Sowjetunion mit »Sputnik« den ersten künstlichen Erdsatelliten in den Kosmos und löste damit in den westlichen Nationen die Befürchtung aus, der UdSSR militärisch und wissenschaftlich-technisch unterlegen zu sein.

116 Eine ausführliche Darstellung der militärischen Softwareprojekte in den USA nach dem Zweiten Weltkrieg findet sich bei Iburg (1991).

wie etwa der Entwicklung der Wasserstoffbombe, durchaus vergleichbar waren. Die Entwicklung von SAGE brachte dabei bereits große Teile des Basiswissens der modernen Softwaretechnik hervor. Das System bestand aus einer Vielzahl von dezentral verteilten Rechnern, die zur Kontrolle und Steuerung von Realzeitprozessen eingesetzt wurden. Dementsprechend machte es eine sehr komplexe Grundsoftware von Betriebssystemen, Kommunikationsprogrammen für die Rechnernetzwerke und On-line-Datenbanken erforderlich. Aus SAGE gingen auch bereits die ersten Time-sharing-Systeme als Voraussetzung der parallelen Datenverarbeitung hervor,¹¹⁷ und auch die graphische Datenverarbeitung nahm dort ihren Anfang (Flamm 1987, 1988).

Eine führende Rolle bei der Entwicklung von SAGE kam dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) zu, das von seiner Zusammenarbeit mit dem DoD auch in zahlreichen anderen Projekten auf dem Gebiet der Computertechnik erheblich profitierte. Vor dem Krieg finanzierte sich das MIT hauptsächlich durch Forschungsaufträge der lokalen Industrie und besaß zu dieser Zeit auch eine entsprechend lokale Orientierung. Während des Zweiten Weltkrieges erhielt das Institut Forschungsaufträge der U.S. Navy, für die es von 1945 bis 1952 auch den elektronischen Rechner »Whirlwind« (Everett 1980: 236–384) entwickelte. Seit dem Beginn der fünfziger Jahre kam es dann im Zuge von SAGE und anderen militärischen Großprojekten in den Genuß von umfangreichen Fördergeldern des DoD und avancierte als Folge des in diesen Projekten generierten Wissens zu einem international renommierten »center of excellence« in der Computer science (vgl. Rosenberg/Nelson 1994: 323–348).

In ähnlicher Weise profitierte auch die amerikanische Computerindustrie von der militärischen Forschungsförderung. SAGE kam einem großen multilateralen Verbundprojekt gleich, an dem sich neben dem MIT und vielen kleineren Hochschuleinrichtungen auch die Bell Laboratories, das Forschungszentrum der amerikanischen Telefongesellschaft AT&T (American Telephone & Telegraph) sowie IBM, RCA, Bendix und General Electric beteiligten.¹¹⁸ Hierdurch entstand ein engmaschiges Netzwerk zwischen den

117 Bei Time-sharing-Systemen oder auch Teilnehmerbetrieb führt der Rechner die Eingaben von mehreren gleichzeitig und voneinander unabhängig arbeitenden Benutzern so aus, als stünde er jedem einzelnen Benutzer allein zur Verfügung.

118 Emerson W. Pugh, Vorstandsmitglied der IBM, bezeichnete die Teilnahme an SAGE rückblickend als die wahrscheinlich wichtigste Entscheidung des Unternehmens in den fünfziger Jahren (Flamm 1988: 262; vgl. auch Hurd 1980: 389–418).

Forschungseinrichtungen und den Computerherstellern, das durch einen regen informellen Informationsaustausch und eine hohe interorganisatorische Mobilität der Wissenschaftler und Ingenieure gekennzeichnet war (Hurd 1980: 389–418). Da die Computerhersteller einen direkten Zugang zu dem Wissen besaßen, das in den militärischen Computerprojekten entstand, konnten sie dieses Know-how in den zivilen Markt transferieren und für den Aufbau einer eigenständigen kommerziellen Softwareproduktion nutzen. So wie die ersten zivilen Rechner der amerikanischen Computerhersteller im Prinzip kleinere Versionen von öffentlich geförderten »defense calculators« waren, beruhten auch die frühen kommerziellen Softwareprodukte auf dem Know-how, das in militärischen Projekten wie SAGE entwickelt wurde.¹¹⁹

Zu dem Angebotsdruck, der mit den militärischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten entstand, trat außerdem etwa ab der Mitte der fünfziger Jahre ein zunehmender Nachfragesog hinzu, der das Engagement der Computerhersteller auf dem Gebiet der Softwaretechnik verstärkte. Zu dieser Zeit begannen sich die Anwender in Benutzerverbänden zu organisieren, die sich wie SHARE im Fall der IBM oder USE im Fall der Remington Rand Corporation um einen bestimmten Hersteller gruppierten (Bauer o.J.: 5). Diese Organisationen verfolgten zunächst das Ziel, bei ihren Mitgliedern entwickelte Systeme im Sinne von »Clubgütern« zu verbreiten, um die Entwicklungskosten der Programme zu senken, gewannen dann aber auch einen erheblichen Einfluß auf die unternehmenspolitischen Entscheidungen der Hersteller (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 37). Die Anbieter widersetzten sich zwar der Gründung solcher Interessengemeinschaften, konnten sich jedoch angesichts des starken Konkurrenzdrucks auf dem Computermarkt einer Kooperation mit ihren Kunden nicht entziehen. Zudem waren die Wissenschaftler und Techniker in den Entwicklungsabteilungen der Hersteller an einer Zusammenarbeit mit Organisationen wie SHARE interessiert (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 37).

Als Folge dieses kombinierten Angebotsdrucks und Nachfragesogs entwickelte sich Software im Verlauf der zweiten Hälfte der fünfziger Jahre zu einer eigenständigen technischen und kommerziellen Größe, die dazu auf die Absatzchancen und Verbreitung der Hardwaresysteme einen entschei-

119 So basierte etwa das von IBM am Beginn der sechziger Jahre entwickelte Flugreservierungssystem SABRE (Semiautomatic Business-Research Environment) als das erste kommerzielle Programm, das im Dialogbetrieb und in Realzeit arbeitete, unmittelbar auf Projektergebnissen zur parallelen Datenverarbeitung, die im Rahmen von SAGE erarbeitet wurden (Flamm 1988: 95).

denden Einfluß gewann. Neben immer umfangreicheren Applikationsprogrammen entstanden zu dieser Zeit auch die ersten kommerziellen Betriebssysteme. Dies waren zunächst einfache »utilities« oder Dienstprogramme, die sich zu sogenannten Monitoren und schließlich zu einer umfangreichen Grundsoftware als einer mehr und mehr selbstverständlichen Ausstattung der Rechner ausweiteten (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 37–40).

Ende der fünfziger Jahre waren Softwareprodukte dann bereits ein integraler Bestandteil der Wettbewerbsstrategien der amerikanischen Computerhersteller, deren Investitionen in die softwaretechnische Forschung und Entwicklung sowohl absolut als auch im Vergleich zu den Kosten der hardwaretechnischen Forschung und Entwicklung immer stärker anstiegen. Während die amerikanische Computerindustrie bei rasch wachsenden Gesamtausgaben für Forschung und Entwicklung in der Mitte der fünfziger Jahre weniger als acht Prozent auf die Softwaretechnik verwandte, stieg dieser Anteil bis 1965 auf über vierzig Prozent an (vgl. Flamm 1988: 96). Am konsequentesten wandte sich IBM der Softwareproduktion zu und richtete als erster Hersteller bereits 1955 ein eigenständiges Softwarelaboratorium ein (Backus 1980).

Allerdings basierten die immer ehrgeizigeren und umfangreicheren militärischen und kommerziellen Anwendungen des Computers weniger auf gesichertem programmiertechnischem Wissen als auf ad hoc generierten, weitgehend unverstandenen Verfahren, kochbuchartigen Daumenregeln und einer induktiv gewonnenen »Triekologie«. »General programming principles were largely nonexistent« (Backus 1980: 126). Die Programmieretechnik entwickelte sich vielmehr auf dem gleichen Weg, wie der Computer entstanden war: durch »bricolage«, »learning-by-doing« und experimentell-pragmatisches Konstruieren. Oder wie Ceruzzi dies formuliert: »Progress in Computer science occurred in the absence of any formal or useful theory« (Ceruzzi 1989: 270).

Anfänglich existierte auch noch keine klare kognitive Trennung zwischen den Maschinen als elektronischen und den Programmen als symbolischen Systemen. Programme wurden als der leicht veränderbare Ersatz für die »feste Verdrahtung« von Hardwarefunktionen verstanden, und die Programmierung nutzte gewissermaßen nur die Möglichkeiten aus, mit denen die Elektronik die Rechner versehen hatte. Dies spiegelte sich auch in der Unterscheidung von Hardware als dem schwer und Software als dem leicht Veränderbaren wider, die um das Ende der fünfziger Jahre aufkam (Ceruzzi 1989: 265). Erst nach und nach trennte sich die Programmierung kognitiv von der Elektronik ab und differenzierte sich zu einer eigenständigen Technik aus, die nur mehr die »Logik als Baustoff« (Wiener 1994) benutzte.

Aber auch dann blieb diese Technik einem maschinenorientierten Ansatz verhaftet. Sie sah die Rechner nicht als Instrumente für Problemlösungen, sondern dachte von den Möglichkeiten der Maschinen her, die es auszunutzen und auszureizen galt (Interview I).

Programmieren war auch weniger eine professionelle Tätigkeit, sondern ein eher künstlerisches Handwerk, das den frühen Softwaretechnikern reichlich Raum bot, ihre Funktionslust auszuleben und immer neue Anwendungsmöglichkeiten des Computers zu entdecken. Programmieren »was really fun« (Backus 1980: 125), und die Entwicklung der Softwaresysteme basierte mehr auf enthusiastischem Engagement als auf methodischem Vorgehen. Die Algorithmen und Programme wurden kaum dokumentiert und noch seltener publiziert (ebd.: 125–126). Das programmiertechnische Wissen bestand aus einem informellen Fundus von Know-how, das sich in den sozialen Netzwerken der Programmierer durch den Austausch von »Tips« und »Tricks« verbreitete (Interview I).

Die Assemblersprachen kamen dieser Auffassung von der Programmierung als einem experimentellen Kunsthandwerk durchaus entgegen und waren wie selbstverständlich das Mittel der ersten Wahl. Diese Sprachen legten den Programmierern keinerlei Restriktionen auf, erlaubten den direkten Zugriff auf die Hardware der Maschinen und ließen ihnen alle Freiheiten, die Möglichkeiten und Besonderheiten der jeweiligen Rechner auszunutzen. Die programmiertechnische Praxis war daher auch wenig an der Entwicklung formaler Hochsprachen interessiert, die sie eines großen Teils ihrer Freiheiten beraubt hätte, und setzte der Einführung solcher Werkzeuge sogar lange Zeit Widerstand entgegen (dazu ausführlich Backus 1980). Formale Hochsprachen mußten aufgrund ihres höheren Abstraktionsniveaus die vielfältigen Ausdrucksmöglichkeiten der maschinennahen Sprachen notwendigerweise einschränken und konnten in den Augen der Praktiker daher auch nie die Flexibilität und Effizienz eines »von Hand« erzeugten Codes erreichen.

Allerdings manövrierte sich die militärische und kommerzielle Softwareentwicklung als Folge der maschinenorientierten Programmierung seit dem Ende der fünfziger Jahre in wachsende technische und ökonomische Probleme. Während die elektronische Forschung und Entwicklung stetige Fortschritte aufweisen konnte und immer leistungsfähigere und stabilere Hardwaresysteme zur Verfügung stellte, wurde die Programmierung in zunehmenden Maße zu einem »bottle neck« oder »reverse salient« (Hughes 1984) der Datenverarbeitung. Die Produktivität der Programmierung stagnierte und sank relativ zu der wachsenden Leistungsfähigkeit der Computer sogar ab (Flamm 1988: 96).

Einer der Gründe hierfür lag zunächst einmal in der mangelnden Portierbarkeit der Softwaresysteme. Die in den maschinenabhängigen Assembler-sprachen erstellten Programme ließen sich nicht zwischen den Rechnern unterschiedlicher Hersteller und bis weit in die sechziger Jahre nicht einmal zwischen den Rechnertypen ein und desselben Anbieters austauschen. Dementsprechend mußte jedes Programm für jede spezielle Maschine auch speziell entwickelt werden (ebd.: 92–93). Dies wog um so schwerer, als die Typenvielfalt der Maschinen immer stärker anstieg. Ende der fünfziger Jahre befanden sich Schätzungen zufolge insgesamt rund zweihundert verschiedene Computertypen auf dem Markt (Heintz 1994: 232). Allein IBM bot um 1960 sechs unterschiedliche Maschinen an und stand kurz vor der Einführung einer neuen Generation von Rechnern (Flamm 1988: 93). In den Augen der Hersteller war die mangelnde Portierbarkeit der Programme zwar anfänglich ein durchaus erwünschter Nebeneffekt der Assemblerprogrammierung, da sie die Anwender an ihre Maschinen band. Die Inkompatibilität der Programme und Maschinen wirkte sich dann aber auch für die Computeranbieter in dem Maße als Problem und Kostenfaktor aus, wie sie selbst zu den Produzenten immer umfangreicherer Softwaresysteme wurden (Flamm 1988: 93).

Zu den Kompatibilitätsproblemen, die von der maschinenorientierten Assemblerprogrammierung ausgingen, traten mit dem wachsenden Umfang der militärischen und kommerziellen Softwaresysteme dann zunehmend auch Komplexitätsprobleme. Mit ihrem wachsenden Umfang erwiesen sich die Programme auch in steigendem Maße als fehleranfällig und machten einen ständig größer werdenden Wartungsaufwand erforderlich. Die Assembler-sprachen erwiesen sich jetzt als immer schwächere Werkzeuge der Programmierung, mit denen sich die steigende Komplexität der Programme immer weniger beherrschen ließ.¹²⁰ Als Folge ihrer fehlenden logischen Struktur und der kaum eingeschränkten Ausdrucksmöglichkeiten dieser Sprachen glichen die Softwaresysteme mehr und mehr einem instabilen Flickwerk von Befehlen, die unkontrolliert abliefen und häufig miteinander in Konflikt gerieten.

Trotz des ständig zunehmenden personellen Aufwands gelang es den Herstellern nicht, die Stabilitätsprobleme ihrer Softwaresysteme in den Griff

120 Große Programme wie das Flugüberwachungssystem SAGE bestanden aus mehreren hunderttausend Anweisungen. Ohne alle erläuternden Dokumentationen, die zu seinem Verständnis aber unbedingt erforderlich sind, ergibt ein Programmsystem mit rund hunderttausend Anweisungen einen Programmtext von etwa zweitausend Seiten (vgl. Rechenberg 1991: 119).

zu bekommen. Auch arbeitsorganisatorische Maßnahmen, mit denen die Programmierarbeit in Einzelaufgaben zerlegt und aufgeteilt wurden, fruchteten nicht, da keine zentrale Instanz mehr dazu in der Lage war, ein großes Programm wie etwa das Betriebssystem OS-360 von IBM als Ganzes zu überblicken (Brooks 1987: 63–74). Als sich außerdem herausstellte, »daß sich bei der Behebung gefundener Fehler etwa ebensoviele neue Fehler einschlichen, wurde es unbehaglich« (Rechenberg 1991: 119). Während die Industrie anfänglich davon ausging, daß die Entwicklung großer Programme nur ein Vielfaches an Personal- und Zeitaufwand einfacher Systeme erforderte, wurde jetzt deutlich, daß dieser Aufwand exponentiell zunahm und ihr buchstäblich über den Kopf wuchs.¹²¹ Mitte der sechziger Jahre nahm die Entwicklung und Wartung größerer Applikationsprogramme oder Betriebssysteme bereits zwei- bis dreitausend Mann-Jahre in Anspruch. Software wurde dementsprechend teuer und qualifizierte Fachkräfte knapp. Lag der finanzielle Aufwand für die Computerhardware im Vergleich zur Software Mitte der fünfziger Jahre noch bei etwa vier zu eins, glichen sich im Verlauf der sechziger Jahre die Kosten für die Herstellung und Wartung größerer Programme an die Preise der Computer selbst an (Flamm 1988: 96).

Zudem wagte sich sowohl die militärische als auch die kommerzielle Praxis der Programmierung mit den wachsenden Verarbeitungskapazitäten der Hardware immer weiter auf theoretisch und methodisch ungesichertes Terrain hinaus. Das prominenteste Beispiel hierfür war die mit der Einführung des Teilnehmerbetriebs und der Realzeitsysteme verbundene parallele Datenverarbeitung. Die Programmierung von parallelen oder, wie der Fachterminus heißt, nebenläufigen Prozessen stellte im Hinblick auf die Komplexität der Softwaresysteme geradezu einen Quantensprung dar. Mit der Programmierung paralleler Prozesse verließ die Softwaretechnik den relativ sicheren Boden sequentieller Systeme und lief damit nicht nur dem Stand des theoretischen Wissens über das korrekte Design solcher Programme weit voraus (Rechenberg 1991: 134–140). Auch die Entwicklung von Verfahren für den Test solcher Programme steckte noch in den Kinderschuhen und erwies sehr viel schwieriger als angenommen.¹²²

121 Wenn n Prozeduren miteinander Informationen austauschen, ergeben sich $n(n-1)/2$ Verbindungen zwischen den Einzelementen. Die Anzahl der Verbindungen wächst also quadratisch mit der Anzahl der verbundenen Objekte (vgl. Rechenberg 1991: 119).

122 Nebenläufige und umgebungsabhängige Prozesse lassen sich nicht mehr mit Hilfe der klassischen zweiwertigen Logik beschreiben. Sie machen eine modale und temporale Logik erforderlich, in der Aussagen zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Wahrheitswerte annehmen können. Auch das Testen von nebenläufigen Programmen be-

Ende der sechziger Jahre kam dann vor allem im militärischen Bereich angesichts des spektakulären Scheiterns einer Reihe großer Softwareprojekte wie etwa Multiple Access Computer (MAC) und der Entdeckung fataler »Bugs« in den hochkomplexen Überwachungs- und Steuerungssystemen der NATO der Begriff von der Softwarekrise auf. So gelangte eine im Auftrag der NATO erstellte Analyse der Störfälle von insgesamt acht großen und komplexen Softwaresystemen wie SAGE, SACCS (Strategic Air Command Control System) oder BMEWS (Ballistic Missile Early Warning System) zu dem Ergebnis, daß diese Systeme nur bedingt einsatzfähig waren und in militärischen Krisensituationen eher eine Gefahr als einen Nutzen darstellten.¹²³ Das Verteidigungsbündnis widmete dem Problem der Softwarekrise 1968 und 1969 zwei Jahrestagungen, die den Begriff zugleich auch populär machten (Iburg 1991: 159–167).

Die Informatik ist als Reaktion auf und »angestoßen durch diese Probleme« (Bauer 1974: 333) der militärischen und kommerziellen Programmierung entstanden. Mit den wachsenden Schwierigkeiten der programmier-technischen Praxis entwickelte sich aus der Idee des »automatic programming« im Verlauf der sechziger Jahre das Konzept der »strukturierten Programmierung« (Dahl/Dijkstra/Hoare 1972), das zum Ziel hatte, die Programmier-technik zu rationalisieren und durch den Weg in die Abstraktion und formale Modellierung von der übermäßigen Komplexität der Assemblersprachen und maschinenorientierten Programmierung zu befreien. Damit verband sich die Absicht, die Softwaretechnik von einem Kunsthandwerk zu einer Ingenieurdisziplin mit eigenständigen professionellen Standards, fest umrissenen Qualitätsnormen und berufsethischen Prinzipien zu führen (Eggeling 1985).¹²⁴

reitet große Schwierigkeiten. Während ein sequentielles Programm, sooft es ausgeführt wird, immer exakt die gleichen Zustände durchläuft, und sich deshalb vergleichsweise gut testen läßt, lassen sich über die individuellen Geschwindigkeiten paralleler Prozesse keine Annahmen machen, da jeder Prozeß jederzeit unterbrochen werden kann, und die Zeitpunkte der Unterbrechung sich von Ausführung zu Ausführung ändern können. Die Folge besteht darin, daß ein Programm erfolgreich laufen, aber fehlerhaft sein kann, und umgekehrt, daß ein fehlerhaftes Programm bei weiteren Läufen nicht wieder die gleichen Fehler aufweisen muß (Rechenberg 1991: 126–134).

- 123 Auf diese Softwaresysteme ging in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von nuklearen Fehlalarmen zurück. Nur die wenigsten und vermutlich nicht einmal die schlimmsten dieser Störfälle sind in der Öffentlichkeit bekannt geworden. Dazu ausführlich Iburg (1991: 180–305).
- 124 Die Informatik ist also in der ursprünglichen Bedeutung des Begriffs als eine Technologie entstanden, die die »Erarbeitung eines normativen, erfahrungsmäßigen oder systematisierenden Aussagensystems« (Sorge 1985: 49) zum Ziel hat.

Die Entstehung und Entwicklung der Informatik vollzog sich dabei weitgehend außerhalb der etablierten akademischen Disziplinen und unabhängig von der Elektrotechnik und Mathematik, die wie schon in den vierziger und fünfziger auch in den sechziger Jahren den Problemen der Programmierung so gut wie keine Beachtung schenkten. Soweit sich die etablierte akademische Forschung und Lehre überhaupt mit den Problemen der Programmierung auseinandersetzte, geschah dies an einzelnen Lehrstühlen von elektrotechnischen und mathematischen Fakultäten, deren Inhaber jedoch befürchten mußten, »not [to] be recognized and adequately rewarded by their peers for doing good work« (Ceruzzi 1989: 266). Sowohl die Elektronik wie die Mathematik reklamierten zwar jeweils für sich, »that computing science was an integral part of their own fields« (Parnas 1990: 18), haben aber zur Entwicklung der Programmierung nichts Nennenswertes beigetragen. Faktisch wandte sich die Elektronik mit der Verselbständigung und Ausdifferenzierung der Softwaretechnik immer stärker von den Anwendungen des Computers und den Problemen der Programmierung ab und spezialisierte sich auf die Entwicklung immer leistungsfähigerer Prozessoren. Die mathematischen Fakultäten reihten den Computer in die instrumentelle Mathematik ein und behandelten ihn nach wie vor in der Hauptsache als ein numerisches Rechengerät. Zur Entwicklung der modernen Hochsprachen hat die Mathematik ebensowenig beige-steuert wie zur Entstehung des Computers selbst.

5.3 Kommerzielle Programmiersprachen und der Beitrag von ALGOL zur Entstehung der Informatik

So entstammen denn auch die ersten höheren Programmiersprachen nicht der Wissenschaft, sondern sind auf Druck der Anwender Mitte der fünfziger Jahre bei den Computerherstellern entstanden. Auch das amerikanische Militär unternahm wie etwa mit dem von der US-Marine 1954 ausgerichteten »Symposium on Automatic Programming« den Versuch, die Entwicklung solcher Sprachen zu initiieren und zu koordinieren. Die kommerzielle Praxis lief diesen militärischen Bemühungen aber voraus. Als Reaktion auf die Forderung von Benutzerorganisationen wie SHARE und USE nach maschinenunabhängigen, komfortableren und effizienteren Werkzeugen als der Assemblerprogrammierung wandten sich die Hersteller neben der Entwicklung von Applikationsprogrammen und Betriebssystemen in der Mitte der fünfzi-

ger Jahre auch dem »automatic programming« zu (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 37–40). Aus ihren Entwicklungsaktivitäten gingen zunächst Softwaretools wie etwa »speedcoding« von IBM oder »short code« für den UNIVAC der Remington Rand Corporation hervor, die sich allerdings nur für sehr kleine Berechnungen eigneten, da sie etwa zwanzigmal langsamer abliefen als entsprechende Assemblerprogramme und auch sonst mit einer Programmiersprache noch wenig gemein hatten (ebd.: 38).¹²⁵

Mit dem Ziel, Speedcode zu einem brauchbaren Softwarewerkzeug weiterzuentwickeln, begann John Backus 1954 bei der IBM mit der Entwicklung von FORTRAN, eines »Formula Translator Automatic Programming System«, das den Merkmalen einer modernen formalen Hochsprache dann bereits näher kam.¹²⁶ Die IBM kündigte FORTRAN noch im selben Jahr an, weckte damit große Erwartungen unter den Anwendern und löste mit MATH-MATIC oder UNICODE zugleich die Entwicklung ähnlicher Sprachen durch ihre Mitbewerber aus (Petzold 1985: 496–498). Die Auslieferung von FORTRAN verzögerte sich jedoch als Folge unerwarteter Schwierigkeiten bei der Implementation der Sprache bis 1957, aber auch dann arbeitete das System weder effizient noch fehlerfrei. FORTRAN »didn't really work when it was delivered. At first people thought it would never be done« (Knuth/Pardo 1980: 259).¹²⁷ Die Sprache wurde zum Teil mit vernichtender Kritik bedacht und fand zunächst nur wenig Akzeptanz.¹²⁸

Vor allem aber löste FORTRAN das Problem der mangelnden Portierbarkeit der Programme nicht befriedigend. FORTRAN war eine nach wie

-
- 125 Speedcoding und Short Code bestanden aus zu mächtigen Befehlen zusammengefaßten Assemblersubroutinen oder auch sogenannten Makroassemblern, die durch Interpreter ausgeführt wurden, die ein Programm während seines Ablaufs übersetzten. Dies führte zu sehr langen Laufzeiten. Compiler dagegen produzieren aus einem Quellcode einen Ziel- oder Objektcode, der nur einmal übersetzt wird, dann als eigenständiges Programm ablauffähig ist und sehr viel weniger Zeit benötigt. Lauffähige und ausreichend effiziente Compiler standen aber erst ab etwa 1957 zur Verfügung (Backus 1980).
- 126 Bei der Entwicklung von FORTRAN stützte sich Backus auf einen experimentellen Compiler, den Laning und Ziegler für den Whirlwind Computer am MIT entworfen hatten (Knuth/Pardo 1980: 241).
- 127 Auch in den Reihen der IBM gab man zu, daß die Sprache gravierende konzeptionelle Mängel besaß und alle Merkmale eines »quick and dirty« entwickelten Produkts aufwies: »FORTRAN wasn't such a giant step. FORTRAN was basically designed as an experiment in object code optimization. It was a laboratory tool for this« (Bemer 1969: 184).
- 128 Für die Verfechter der Assemblerprogrammierung war FORTRAN ohnehin keine brauchbare Alternative. So bemerkte Wilkes zu FORTRAN: »Experienced programmers will be able to obtain greater efficiency by using more conventional methods of programming« (Wilkes, zitiert nach Knuth/Pardo 1980: 260).

vor maschinenorientierte Sprache und konzeptionell noch stark von der Assemblerprogrammierung beeinflußt. Als Produkt der IBM war sie zudem eng an den Spezifikationen der Hardwaresysteme dieses Herstellers und speziell an dessen neuem Flaggschiff, dem System 704, orientiert. Mit den Programmiersprachen anderer Hersteller wie MATH-MATIC oder UNICODE verhielt es sich nicht anders. Diese Entwicklungen teilten im wesentlichen die Probleme des Entwurfs von IBM und waren ebenfalls maschinen-nah ausgelegt und auf die Hardwarestruktur der Rechner zugeschnitten (Bauer o.J.: 4). Die Hersteller kamen zwar dem Wunsch der Anwender nach komfortableren Programmierwerkzeugen nach, setzten aber auch alles daran, den für sie vorteilhaften Effekt der Kundenbindung, der mit der maschinennahen Programmierung verbunden war, zu erhalten. Aus diesem anfänglichen Nebeneffekt wurde jetzt eine bewußte Wettbewerbsstrategie, da jeder Hersteller versuchte, seine proprietäre Programmiersprache als Industriestandard durchzusetzen.

Angesichts der Vielfalt von inkompatiblen und herstellerspezifischen Sprachkonzepten und des einsetzenden Wettkampfs unter den Anbietern um die Durchsetzung proprietärer Standards versuchten die Benutzerorganisationen und vor allem SHARE bereits 1957, die Koordination auf dem Gebiet der Programmiersprachen an sich zu ziehen. Um zu verhindern, daß sich ein proprietäres System als De-facto-Standard durchsetzte und ein einzelner Hersteller die Kontrolle über diesen Standard erlangte, ergriff SHARE in diesem Jahr die Initiative für die Entwicklung einer einheitlichen nationalen Programmiersprache mit der Bezeichnung UNCOL (Universal Computer Oriented Language) auf der Ebene der Anwendervereinigungen und der wissenschaftlichen Organisationen (Bemer 1969).

Als einflußreicher beruflicher und wissenschaftlicher Verband auf dem Gebiet der Computertechnik schloß sich die Association for Computing Machinery (ACM) dieser Initiative von SHARE an und richtete ein Komitee ein, das sich paritätisch aus Vertretern der Anwender, der Universitäten, der Industrie sowie der amerikanischen Bundesregierung zusammensetzte und zur Aufgabe hatte, die Spezifikationen für die nationale Standardsprache UNCOL zu erarbeiten. Dieser Ausschuß hat sich jedoch nie mit UNCOL befaßt, sondern griff 1958 auf das plötzlich auftauchende Angebot der GaMM zurück, die von einem schweizerisch-deutschen Team von Computerwissenschaftlern kurz zuvor entwickelte Programmiersprache ALGOL (Algorithmic Language) zu übernehmen und zur internationalen Standardsprache zu führen (Bemer 1969).

Damit nahm die Entwicklung der Programmiersprachen nun eine unerwartete Wende. Das Vorhaben, ALGOL als internationale Standardsprache einzuführen, wurde in den USA und kurze Zeit später auch in den meisten europäischen Ländern geradezu enthusiastisch aufgenommen. Die von den schweizerisch-deutschen Computerwissenschaftlern entwickelte Sprache war tatsächlich weitgehend maschinenunabhängig und von bereits hohem wissenschaftlichem Niveau. Mit ALGOL begann das Projekt der wissenschaftlichen Programmierung, mit dem es auch zumindest zeitweise so schien, als könne die Wissenschaft die Führungsrolle in der Programmierertechnik übernehmen. ALGOL kam in zweifacher Hinsicht einer Zäsur in der Entwicklung der Programmiersprachen gleich. Sie führte erstmals auf breiter Basis zu einer theoretischen Auseinandersetzung mit der Programmierung und hatte zugleich eine Sammlungsbewegung der Computerwissenschaft im Rahmen der International Federation for Information Processing (IFIP) als einer Einrichtung der UNESCO zur Folge. ALGOL besaß damit eine Art katalytische Wirkung auf die Entwicklung der wissenschaftlichen Programmierung, die jetzt kognitiv und institutionell Konturen annahm. Mit ihr entwickelte sich die Computer science zu einem international koordinierten und kumulativen formalwissenschaftlichen Projekt (Knuth/Pardo 1980: 266).

ALGOL wurde nicht zufällig in computertechnisch so rückständigen Ländern wie der Schweiz und Deutschland entwickelt. In diesen Ländern gab es weder eine Computerindustrie noch entsprechende militärische Projekte und schließlich auch keine kommerzielle Softwareproduktion wie in den USA. Gerade dies aber begünstigte es, daß hier die erste maschinenunabhängige und wissenschaftliche Programmiersprache entstehen konnte. Während die Computer science in den USA von der anwendungsorientierten militärischen und kommerziellen Projekt- und Auftragsforschung dominiert wurde, lag sie im deutschsprachigen Raum bis weit in die zweite Hälfte der fünfziger Jahre bei einer kleinen Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die ihre Arbeiten autonom und unabhängig von militärischen und kommerziellen Anwendungs- und Verwertungsinteressen vorantreiben konnte.¹²⁹ Diese Gemeinschaft besaß auch keine »vested interests« in einen bestimmten programmiertechnischen Ansatz wie etwa die Schule um Wilkes, die sich mit den Assembler-sprachen auf den Von-Neumann-Stil der Programmierung festgelegt hatte. Dementsprechend konnte sie die Entwicklungen in den USA und in England

129 Zum Entwicklungsstand der Computertechnik in der Schweiz und in Deutschland in den fünfziger Jahren vgl. ausführlich Petzold (1985).

kritisch verfolgen und zu einem eigenständigen Ansatz in der Programmierung gelangen (Interview I; Interview IV).

Soweit man in Deutschland von so etwas wie einer kommerziellen Herstellung von Rechnern sprechen konnte, bezog sich dies auf die kleine Firma von Konrad Zuse, der nach einer etwa fünfjährigen Unterbrechung seiner Arbeiten an der Z-Reihe seit dem Beginn der fünfziger Jahre im Kundenauftrag und in handwerklicher Weise einige wenige Spezialmaschinen und Unikate zunächst sogar noch in der überkommenen Relais-technik anfertigte. Unternehmen wie Telefunken, SEL oder Siemens, die später in Deutschland als Anbieter von Computersystemen auftraten, konzipierten ihre Maschinen erst in den späten fünfziger Jahren und waren meist nicht vor 1960 mit ihren Entwicklungen am Markt. Die IBM lieferte erst nach der Unterzeichnung der Pariser Verträge im Jahr 1955 und der damit verbundenen Aufhebung des alliierten Verbots, Computer nach Deutschland einzuführen, ihre erste Maschine hierher aus und begann dann um 1957/58 mit der Produktion von größeren Stückzahlen in Sindelfingen (vgl. Petzold 1985: 436–475).

Auch an den wissenschaftlichen Einrichtungen des deutschsprachigen Raums setzte die Entwicklung von Rechnern erst zu einem Zeitpunkt ein, als der Computer in den USA bereits industriell produziert wurde und dort die Phase der universitätseigenen Maschinen am Beginn der fünfziger Jahre bereits zu Ende ging. So befaßte sich in der Schweiz das Institut für praktische Mathematik an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich unter der Leitung von Eduard Stiefel ab 1952 mit dem Bau des elektronischen Rechners ERMETH (Elektronische Rechenmaschine ETH). In der Bundesrepublik förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) seit 1950/51 die Entwicklung solcher Rechner an insgesamt drei Instituten im Rahmen eines Sonderprogramms, das dann 1956 angesichts der abzusehenden industriellen Produktion von Computern zugunsten eines Beschaffungsprogramms auslief. Im einzelnen waren dies das von Alvin Walther geführte Institut für praktische Mathematik der Technischen Universität Darmstadt, das an der Entwicklung von DERA (Darmstädter Elektronischer Rechenautomat) arbeitete, das Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen, dessen astrophysikalische Abteilung sich unter Ludwig Biermann mit dem Bau der Rechner G1 bis G3 befaßte, sowie das Institut für Nachrichtentechnik an der Technischen Universität München mit Hans Piloty als Direktor, das mit der PERM (Programmgesteuerte Elektronische Rechenanlage München) den MIT-Rechner »Whirlwind« nachbaute. Diese Institute standen untereinander in engem Kontakt und führten einen regen Informationsaustausch (Petzold 1985: 373–396).

An den Instituten in Zürich, Darmstadt, Göttingen und München stand am Beginn der fünfziger Jahre noch lange nicht fest, daß der Computer mit der Von-Neumann-Maschine und seine Programmierung mit Assembler-technik identisch sein mußte. Dort wurden die Projekte in den USA und in England aufmerksam verfolgt, zum Teil bestanden auch persönliche Kontakte zu den Computerwissenschaftlern in Princeton oder Manchester. Generell aber überwog die Einschätzung, daß mit der Von-Neumann-Maschine und Assemblerprogrammierung das »Pferd von hinten aufgezümt« (Interview II) und die Programmierung von der Struktur der Maschinen statt von den zu lösenden Problemen abhängig gemacht werde. Das Ziel der schweizerisch-deutschen Institute bestand dagegen in der »Angleichung der Programmierung an die in jahrhundertelanger Entwicklung entstandene Symbolik der Mathematik« und dem »formelgesteuerten« Rechner (Bauer o.J.: 3).¹³⁰

Die Entwicklung von ALGOL ging auf die Initiative der Mathematiker Friedrich L. Bauer und Klaus Samelson vom Institut für Nachrichtentechnik in München zurück, die über die Entwicklung eines Assemblercodes für die PERM als der Kopie von »Whirlwind« zu der Auffassung gelangten, daß die Assemblerprogrammierung nicht mehr als »eine zeitraubende und fehleranfällige, im allgemeinen nur lästige Angelegenheit« war (Bauer/Samelson, zitiert nach Petzold 1985: 492), bei der die eigentlich zu lösenden algorithmischen Probleme in einer Fülle von maschinenspezifischen Details verschwanden. Bei ihrer Suche nach Alternativen zur Assemblerprogrammierung stießen sie 1955 auf das Prinzip der Kellermaschine. Dieses Prinzip war in München bereits 1951 für den formelgesteuerten Rechner »Stanislaus« entwickelt worden, der in fest verdrahteter Form einen sogenannten Zahlenkeller besaß, in dem Teilergebnisse des Rechenprozesses, die während des Programmablaufs »warten« mußten, zwischengespeichert werden konnten.¹³¹

Wie es sich bei genauerer Betrachtung herausstellte, ließ sich das Prinzip des Kellerspeichers aber ebensogut auf die Abarbeitung von Formeln übertragen. So wie die Daten bis zur ihrer Weiterverarbeitung in einem Keller abgelegt werden konnten, ließen sich auch die Zeichen innerhalb mathema-

130 Vgl. auch Petzold (1985: 494), der dies als Forderung »zurück zur mathematischen Natur« und »gegen die unnatürliche Maschine und deren künstliche Forderungen« beschreibt.

131 Ein Keller ist ein mehrgeschossig übereinander angeordnetes Speichersystem, das nach dem Prinzip »last in – first out« arbeitet und deshalb auch als LIFO-Speicher bezeichnet wird (Duden Informatik 1993: Stichwort Keller).

tischer Formeln, die nicht sofort weiterverarbeitet wurden, in speziellen Kellerspeichern zwischenlagern. Ein solcher Kellerautomat erlaubte es, eine Universalmaschine zu konzipieren, bei der anders als im Fall des Von-Neumann-Rechners die Ablaufsteuerung des Programms und die Datenstrukturen logisch getrennt waren. Diese logische Trennung ließ es nun auch erstmals zu, die Syntax und Semantik einer Programmiersprache sauber zu definieren und sie der mathematischen Notation anzugleichen. »Nach und nach zeigte sich, daß die Methode des Kellerprinzips nicht nur arithmetische Formeln betraf, sondern auf die gesamte Programmiersprache ausgedehnt werden konnte« (Bauer 1991: 2).

Ihre Entdeckung, daß sich mit der Ausdehnung des Kellerprinzips auf die Ablaufsteuerung eine Universalmaschine realisieren ließ, die es ermöglichte, Programme in der algebraischen Notation zu schreiben und den Von-Neumann-Stil der Programmierung zu überwinden, veranlaßten Bauer und Samelson 1955 zu dem Entschluß, mit ALGOL eine maschinenunabhängige, algorithmische Programmiersprache zu entwickeln. Neben wissenschaftlichen Zwecken verfolgten sie angesichts der aktuellen Entwicklungen in den USA die »politischen Ziele«, die »Unabhängigkeit der Programmierung von der zu erwartenden Proliferation der Maschinen« zu wahren, ein »Auseinanderfallen der Programmiersprachen« zu vermeiden und zu einer »Vereinheitlichung der Programmierung« zu gelangen (Bauer o.J.: 4). Für dieses Vorhaben gewannen Bauer und Samelson auch die computerwissenschaftlichen Institute in Zürich und Darmstadt, die sich an der Entwicklung von ALGOL beteiligten und parallel dazu entsprechende Compiler für ihre jeweiligen Rechner entwickelten.¹³² Auch die GaMM unterstützte die Ent-

132 Durch einen Zufall kam als Folge der Beteiligung des Instituts für praktische Mathematik in Zürich auch der Plankalkül von Konrad Zuse wieder ins Spiel, nachdem auch Bauer und Samelson dieser Programmiersprache zunächst keine Beachtung geschenkt hatten. Das Institut für praktische Mathematik hatte 1949 Zuses Z-4 erworben (Petzold 1985: 340). H. Rutishauser, einer der Mitarbeiter des Instituts, der für die Programmierung der Maschine zuständig war, hatte dabei auch Zuses Arbeiten über den Plankalkül kennengelernt. In der Zeitschrift für angewandte Mathematik veröffentlichte Rutishauser 1951 einen Aufsatz über »Automatische Rechenplanfertigung«, in dem er zeigte, daß sich »die programmgesteuerte Rechenmaschine selbst dank ihrer Vielseitigkeit als Planfertigungsgerät« (Rutishauser, zitiert nach Petzold 1985: 485) verwenden ließ. Er beschrieb dort für eine einfache algebraische Programmiersprache, die er in Anlehnung an Zuses Terminologie als »Superplan« bezeichnete, einen der weltweit ersten Compiler (Bauer 1980: 515–518; Knuth/Pardo 1985: 218–222). Für Rutishauser blieb dieser Aufsatz aber nur eine Art Gelegenheitsarbeit, die er vorerst nicht weiterverfolgte. Bauer und Samelson wiederum nahmen dann diesen Aufsatz zum Anlaß, Rutishauser an der Ent-

wicklung von ALGOL und richtete einen »Ausschuß für Fragen der Programmierungstechnik« ein, dessen Vorsitz Bauer übernahm. Das ALGOL-Projekt nahm knapp zwei Jahre in Anspruch und geriet dann 1957/58 auf einen Erfolgskurs, der auch die kühnsten Erwartungen der Beteiligten bei weitem übertraf. ALGOL, zunächst nur als einheitliche Programmiersprache für die Rechner der schweizerisch-deutschen Institute gedacht, schien jetzt zur internationalen Standardsprache avancieren zu können.

Anläßlich eines Studienaufenthalts in den USA bot sich Bauer 1957 die Gelegenheit, den Sprachentwurf dem Komitee der ACM vorzustellen, das unverzüglich auf sein Angebot einging, ALGOL statt UNCOL als Standardsprache zu übernehmen. Gemeinsam mit der GaMM richtete die ACM Anfang 1958 die heute als »historisch« (Knuth/Pardo 1980: 266) geltende erste ALGOL-Konferenz in Zürich aus, auf der unter anderen Backus und Karr als die maßgeblichen Entwickler von FORTRAN beziehungsweise MATHEMATIC, gemeinsam mit der schweizerisch-deutschen Gruppe den »ALGOL-58-Report« erarbeiteten. Anders als seine eigene Entwicklung FORTRAN wertete Backus ALGOL als »a major contribution toward transforming the field of numerical computation from a somewhat parochial and divided enterprise into a truly international scientific discipline«¹³³ und trug mit dieser Einschätzung erheblich zum wissenschaftlichen Erfolg dieser Sprache bei.

Der »ALGOL-58-Report« wurde in der Zeitschrift Numerische Mathematik mit einem Aufruf zur Diskussion des Entwurfs veröffentlicht und sollte als Grundlage für die Entwicklung einer endgültigen Sprachversion dienen. Der Report von 1958 zog fast schlagartig das Interesse der gesamten internationalen Fachwelt auf sich und löste eine Vielzahl von Konferenzen und Symposien aus (Petzold 1985: 501–504). In seiner Folge entstanden auch die ersten eigenständigen wissenschaftlichen Zeitschriften und institutionalisierten Foren zur Koordination der bis dahin lokal verstreuten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Programmierung.¹³⁴ In Kopenhagen begann Peter Naur 1959 mit der Herausgabe des »ALGOL-Bulletins«, und die ACM richtete für die Programmiersprache in

wicklung von ALGOL zu beteiligen. Hierdurch wiederum sind Teile des Plankalküls in ALGOL eingeflossen (Bauer 1980).

133 John Backus to SHARE, zitiert nach Bemer (1969: 164).

134 Zugleich rissen aber auch die Kontakte zwischen östlichen und westlichen Computerexperten am Ende der fünfziger, Anfang der sechziger Jahre endgültig ab. Wie es scheint, haben die Länder des RGW nach 1960 so gut wie nichts mehr zur Computer science beigetragen und die westlichen Standards offenbar immer nur übernommen (Interview II). Diese Vermutung läßt sich freilich nicht mit Literatur belegen.

ihrer Zeitschrift »Communications of the ACM« eine spezielle Rubrik ein. Unterstützt wurde ALGOL auch durch die UNESCO, die 1959 mit der »International Conference on Information Processing« die größte und wichtigste ALGOL-Tagung ausrichtete. Aus dieser Tagung ging 1960 die International Federation on Information Processing (IFIP) hervor, der unter anderem die Aufgabe zufiel, die Wartung und Weiterentwicklung der Sprachdefinition von ALGOL auf internationaler Ebene zu koordinieren (Bemer 1969). Die Gründung dieses internationalen Verbands wiederum hatte zur Folge, daß in den meisten europäischen Ländern in den sechziger Jahren nationale wissenschaftliche und berufliche Vereinigungen auf dem Gebiet der Informationstechnik und Informatik entstanden, die ihrerseits Mitglied der IFIP wurden.¹³⁵

5.4 Computer science als Formalwissenschaft

Die Entwicklung der Programmiersprachen wird heute in eine Ära vor und nach ALGOL eingeteilt (Sammet 1969; Knuth/Pardo 1980; Wells 1980). ALGOL selbst besaß aus heutiger Sicht zwar noch durchaus gravierende Mängel, der Sprachentwurf enthielt aber richtungsweisende theoretische und methodische Innovationen, mit denen die Programmiersprachen jetzt zunehmend als formale Maschinenmodelle und mathematische Untersuchungsobjekte aufgefaßt wurden. Der Sprachentwurf basierte erstmals auf genuin informatischen Konzepten wie Blöcken, Prozeduren, automatischer Rekursion und höheren Kontrollstrukturen, auf denen alle späteren wissenschaftlichen Hochsprachen aufbauten (Sammet 1969: 175). Auch die von Niklaus Wirth am Ende der sechziger Jahre entwickelte Programmiersprache Pascal, die heute als die erste »Informatik-Sprache« (Rechenberg 1991: 110) gilt, ist eine Weiterentwicklung von ALGOL.

Anfänglich in erster Linie als ein Werkzeug zur komfortableren Programmierung der Maschinen gedacht, wurde das »Automatic Programming« mittels höherer Sprachen nach dem Erscheinen von ALGOL zunehmend als

135 Mitglieder der IFIP sind nicht Personen, sondern je Land ein wissenschaftlicher beziehungsweise beruflicher Verband auf dem Gebiet der Informationstechnik. Im Fall der Bundesrepublik ist dies heute die Gesellschaft für Informatik (GI) als sowohl wissenschaftliche wie berufsständische Vertretung der Informatiker (vgl. zur Funktionsweise der IFIP auch Schmidt/Werle 1998).

ein Mittel zur Steigerung ihrer Produktivität und als Waffe im Kampf gegen die Komplexität der Programme betrachtet. In einer Sprache wie ALGOL mußte ein Programm nur einmal geschrieben werden und ließ sich dann mit Hilfe von Compilern auf jeden beliebigen Rechner portieren. Dies löste das Kompatibilitätsproblem und steigerte zugleich die Effizienz der Programmierarbeit. Die Programmierung wurde zudem von den maschinenspezifischen Details entlastet, konnte sich ganz auf Formulierung der Algorithmen und damit auf das beschränken, was die Maschine ausführen sollte, und es ihr selbst überlassen, wie sie dies tat. Damit fielen mit einem Schlag ganze Klassen von Fehlerquellen weg. Die Programme wurden aufgrund ihrer algorithmischen Struktur kürzer und leichter lesbar als die maschinenorientierten Assemblerprogramme. Vor allem aber machte es ihre algorithmische Struktur auch prinzipiell möglich, die Programme selbst als mathematische Formeln zu behandeln und ihre Korrektheit formal zu beweisen (Hoare 1972).

ALGOL entwickelte sich damit angesichts der zunehmenden Komplexität und Fehleranfälligkeit der Softwaresysteme im Verlauf der sechziger Jahre zum Leitbild der »strukturierten Programmierung« (Dahl/Dijkstra/Hoare 1972), die den Weg in die Abstraktion und Formalisierung antrat und der kunsthandwerklichen Praxis im militärischen und kommerziellen Bereich eine exakte ingenieurwissenschaftliche Lehre von der Programmierung entgegenstellte.¹³⁶ Im Zuge dieses Perspektivenwechsels knüpfte die wissenschaftliche Diskussion mit der Turingmaschine, der Churchschen These und der Theorie der Algorithmen nun auch an theoretische Grundlagen an, auf denen sie prinzipiell bereits in der Mitte der vierziger Jahre hätte aufbauen können, die jedoch als Folge der anfänglich engen Orientierung der Programmierung an den Möglichkeiten der Hardwaresysteme und den rasch wachsenden militärischen und kommerziellen Anwendungen des Computers aus den Augen geraten waren.

Die jetzt einsetzende Forschung über die Syntax und Semantik formaler Sprachen »marked the beginning of a more rigorous approach to programming languages« (Sammet 1969: 175). Als Pionierarbeit gilt in diesem Zusammenhang die von Backus 1959 entwickelte formale Sprachbeschreibung von ALGOL, die zunächst unter der Bezeichnung »Backus-Normal-Form« und später als »Backus-Nauer-Form« in die Literatur einging. Die »Backus-Normal-Form« leitete den Beginn des syntax-orientierten Übersetzerbaus

136 Dies kommt auch in dem Kunstwort Informatik zum Ausdruck, das sich aus Information und Mathematik zusammensetzt und heute den Begriff Computer science weitgehend abgelöst hat.

ein, mit dem es prinzipiell möglich wurde, Compiler zu verifizieren. Im Anschluß an die formale Sprachbeschreibung von Backus entstand eine Reihe weiterer Formalismen zur Definition der Syntax von Programmiersprachen, die heute in die sogenannten kontextfreien, kontextsensitiven, linearen und regulären Grammatiken eingeteilt werden (Duden Informatik 1993: Stichwort Backus-Normal-Form). Gleichzeitig oder wenig später wurden auch mit der Übersetzersemantik sowie der operationalen, denotationellen und axiomatischen Semantik die ersten Konzepte zur formalen Beschreibung der inhaltlichen Bedeutung von Programmiersprachen entwickelt (Duden Informatik 1993: Stichwort Semantik).

Eine gewisse Sonderstellung unter diesen Metasprachen nahmen dabei die sogenannten Petri-Netze ein, die mit dem Aufkommen von Realzeitsystemen und des Teilnehmerbetriebs 1962 speziell zur Analyse von parallelen beziehungsweise nebenläufigen Prozessen entwickelt wurden (Petri 1962). Als Reaktion auf den Verlust des relativ sicheren Bodens der zweiwertigen Logik, der mit dem Übergang von rein sequentiell ablaufenden Programmen zu nebenläufigen Systemen verbunden war, entstanden 1963 mit den Arbeiten von Saul Kripke über modallogische Semantik auch die ersten Versuche, eine nichtmonotone formale Logik zur Beschreibung von parallelen Prozessen zu entwickeln (Bauer o.J.: 9). Mit Arbeiten wie der von Kripke bildete sich jetzt eine völlig neue Forschungsrichtung auf dem Gebiet der formalen Logik heraus, die nicht mehr nur auf rein innermathematische Fragestellungen zurückging, sondern durch die praktischen Probleme der Programmierung angestoßen wurde.

Seit dem Beginn der sechziger Jahre setzte damit die Emanzipation des algorithmischen Denkens vom Computer als physikalischer Maschine ein. Nach der faktischen Ablösung der Softwaretechnik von der Elektronik kam es jetzt auch in wachsendem Maße zu bewußten Bestrebungen, die Programmierung auch konzeptionell von der Hardwaretechnik abzutrennen und auf eine formalwissenschaftliche Basis zu stellen. Der Computer als physikalische Maschine und die Hardware der Rechner wurden jetzt mehr und mehr als »gegebene« Technik und die Computer science zunehmend als die wissenschaftliche Lehre von den Algorithmen betrachtet.

Diese Emanzipation des algorithmischen Denkens von den physikalischen Maschinen belegte auch das 1968 erschienene Werk von Donald Knuth »Fundamental Algorithms« als der erste von insgesamt drei Bänden (Knuth 1968–1973), das ähnlich wie ALGOL als ein Meilenstein in der Entwicklung der Computer science und Informatik gilt. Knuth kodifizierte und formalisierte in diesen drei Bänden eine Fülle von Techniken und

»Tricks«, die in der Programmierpraxis seit Jahren informell bekannt waren, und führte das dort experimentell und induktiv gewonnene Wissen auf allgemeine mathematische Prinzipien zurück. »Fundamental Algorithms consciously defined the study of Algorithms as a subject that was independent of any machine that might implement them« und hatte zum Ziel, »to place computer programming on a foundation of mathematical principles and theorems« (Ceruzzi 1989: 268).¹³⁷

Die formalistische Schule um Ole-Johan Dahl, Edsger W. Dijkstra und C.A.R. Hoare (Dahl/Dijkstra/Hoare 1972) ging noch einen Schritt weiter und definierte die Computer science nicht nur als Lehre von den Algorithmen, sondern als Wissenschaft von der organisierten Komplexität, die sich den Versuchungen des technisch Machbaren konsequent zu enthalten und allein der formalen Korrektheit der Programme zu widmen habe. So beklagte Dijkstra:

Size, complexity and sophistication of programs one should like to make have exploded and over the past ten years it has become patently clear that on the whole our programming ability has not kept pace with these exploding demands made on it. (Dijkstra 1972: 5)

Er forderte deshalb, daß sich die Computer science nicht nur von den konkreten Maschinen, sondern auch von ihrer unmittelbaren Anwendungsorientierung abzulösen habe.

Now the teaching of programming comprises the teaching of facts – facts about systems, machines, programming languages etc. – and it is very easy to be explicit about them, but the trouble is that these facts represent about 10 percent of what has to be taught: the remaining 90 percent is problem solving and how to avoid unmastered complexity. (ebd.: 107)

Um die Komplexitätsprobleme der Programmierung zu meistern, sei es erforderlich »to define programming semantics independently of any underlying computational model ... and to forget that program texts can also be interpreted as executable code« (ebd.: 275). Programme seien wie mathematische Sätze zu behandeln und müßten wie diese durch formale Beweisführung verifiziert werden. Denn, so Dijkstras berühmt gewordenes Argument,

137 »Fundamental Algorithms« lieferte auch die erste internalistische Deutung der Computer science. Knuth zog erstmals Verbindungslinien vom antiken Abakus zum modernen Computer und stellte ihn in eine Reihe mit den Rechenmaschinen von Wilhelm Schickard oder Blaise Pascal. In seinen Augen hatte das algorithmische Denken schon immer im Mittelpunkt der Mathematik und Logik gestanden (Ceruzzi 1989: 269).

»programme testing can be used to show the presence of bugs, but never to show their absence« (ebd.: 6). Die formalistische Schule um Dahl, Dijkstra und Hoare gewann Ende der sechziger Jahre großen Einfluß auf die Computer science, in dessen Folge die Programmverifikation zum »ultimativen Ziel« (Wirth o.J.: 12) der sich kurze Zeit später an den Hochschulen etablierenden Informatik wurde. Hoare entwickelte 1969 mit dem axiomatischen Ansatz ein Verfahren zur automatischen Verifikation von Programmen, das unter der Bezeichnung »hoare-logic« bekannt wurde und eine intensive Forschung über Verifikationsverfahren auslöste (Hoare 1984).

Nicht zuletzt aber ging es den Verfechtern der strukturierten Programmierung auch darum, dem kunsthandwerklichen Selbstverständnis der programmiertechnischen Praxis ein professionelles, ingenieurwissenschaftliches Ethos entgegenzusetzen. Die Lehre von der strukturierten Programmierung war zugleich auch eine Lehre vom »egoless programming« und »humble programmer« (Eggeling 1984: 82), der stets damit rechnet, Fehler zu machen und den Ergebnissen seiner Arbeit im Rahmen einer »defensiven Grundhaltung« (Rechenberg 1991: 123–124) stets mißtrauisch gegenübersteht. Für den »humble programmer« sollte der Verzicht auf die Verwendung niederer und nicht restringierter Sprachelemente wie des Sprungbefehls GOTO zugunsten höherer und kontrollierter Anweisungen wie der REPEAT-UNTIL-Schleife selbstverständlich werden. Mit dieser Forderung lösten die Verfechter der strukturierten Programmierung am Ende der sechziger Jahre die sogenannte GOTO-Debatte in der Computer science aus, die auch als »Ende der Pionierzeit« und Beginn der »Industrialisierung der Programmierarbeit« in die Literatur eingegangen ist (Eggeling 1984, 1985).

Dem Ziel einer »Industrialisierung der Programmierarbeit« entsprach auch das präskriptive Modell vom »Softwarezyklus«, das sich ebenfalls zu dieser Zeit als Leitbild der Programmierung durchzusetzen begann. Im Kern läuft dieses Modell auf fünf voneinander getrennte und jeweils abgeschlossene Phasen in der Entwicklung eines Programms hinaus. In der ersten Phase wird das zu lösende Problem analysiert und die Anforderungsdefinition an das zu erstellende System festgelegt. Die zweite Phase dient dem Entwurf der Systemarchitektur (Grobentwurf), die sich aus hierarchisch strukturierten Modulen zusammensetzt, die je einzeln entwickelt und schrittweise verfeinert werden (Feinentwurf). In der dritten Phase sind die Module zu programmieren und je einzeln zu testen, während in der vierten Phase das Gesamtsystem zusammengesetzt und getestet wird. Das Ergebnis der vierten Phase besteht in der Abnahme des Systems durch den Auftraggeber. Dem folgt als fünfte Phase die Wartung, bei der verbliebene Fehler beseitigt wer-

den und das Programm in engen Grenzen an veränderte Anforderungen angepaßt wird. Da ein Programm durch Veränderungen im Zuge seiner Wartung seinen systemischen Charakter verliert, muß es ab einem bestimmten Punkt dann definitiv »verschrottet« und in einem neuen Zyklus komplett neu entworfen werden (vgl. zur Lehre vom Softwarezyklus etwa Rechenberg 1991: 121–124).

Mit dem Konzept der strukturierten Programmierung setzte sich am Ende der sechziger Jahre dann auch allgemein die Auffassung durch, daß es sich bei der Computer science um eine von der Mathematik und Elektronik deutlich geschiedene »Geistes-Ingenieurwissenschaft« (Bauer 1974: 333) handelte, deren zentrale Aufgabe in der »Normierung des Entwurfs und des Schreibens von Software« (Mahr 1984: 104) bestand, während das in der KI-Forschung formulierte, induktiv-empirische Programm für die Computer science bedeutungslos wurde. Diese Auffassung von der Computer science als einer formalen und präskriptiven Ingenieurwissenschaft vertrat auch das sogenannte »Curriculum '68«, mit dem die ACM im Jahr 1968 erstmals einen Vorschlag für die Einrichtung eines Standardstudiengangs für Computewissenschaftler unterbreitete (Ceruzzi 1989: 268–270). Das Curriculum der ACM leistete entscheidende Geburtshilfe bei der Institutionalisierung der Informatik als akademischer Disziplin und wurde von den europäischen Wissenschaftsorganisationen und Berufsverbänden im Bereich der Informationstechnik praktisch unverändert übernommen.

Mit dem Curriculum der ACM grenzte sich die Computer science als Lehre von den Algorithmen und Programmen von der Mathematik und Elektrotechnik deutlich ab. Elektrotechnische Kurse waren in den Pflichtveranstaltungen, die der Lehrplan für die künftigen Studenten der Informatik vorsah, bereits nicht mehr enthalten. Seit dem Lehrplan der ACM wird die Informatik in vier Unterfächer eingeteilt: praktische, theoretische, technische und angewandte Informatik. Die praktische Informatik behandelt im wesentlichen die Algorithmen und Datenstrukturen, die Programmiersprachen und Programmiermethoden sowie den Compilerbau und die Betriebssysteme. Die theoretische Informatik markiert mit der Automatentheorie, der Komplexitätstheorie, der Theorie der Berechenbarkeit und der formalen Sprachen die Grenze zur Mathematik. Die Grenze zur Elektrotechnik bildet die technische Informatik, die sich mit der Architektur und logischen Organisation von Schaltwerken, Schaltnetzen, Schnittstellen sowie verteilten Systemen und Rechnernetzwerken auseinandersetzt. In der technischen Informatik geht es also primär um die logische Struktur von Hardwarekomponenten. Dagegen fallen die elektronischen Schaltungen selbst in den Gegen-

standsbereich der Elektronik und Halbleiterphysik. Die Teilgebiete praktische, theoretische und technische Informatik werden auch als Kerninformatik bezeichnet, während die angewandte Informatik die Einsatzmöglichkeiten von Informationssystemen in der Produktion, Verwaltung, Politik und Wissenschaft untersucht und alle sogenannten Bindestrich-Informatiken wie die Wirtschafts- oder Betriebs-Informatik umfaßt (vgl. zu dieser Einteilung auch Rechenberg 1991: 11–14).

Etwa gleichzeitig mit dem Erscheinen des Lehrplans der ACM setzt auch in Europa erstmals in größerem Umfang eine öffentliche Förderung der Datenverarbeitung und Informationstechnik ein. Diese staatlichen Förderprogramme waren, wie etwa das »1. Datenverarbeitungsprogramm« von 1967, in der Bundesrepublik Deutschland zunächst vor allem unter dem Eindruck der Diskussion um die sogenannte »wissenschaftlich-technologische Lücke« entstanden (Stucke 1993). Diese Diskussion war um die Mitte der sechziger Jahre durch eine Reihe von OECD-Studien entfacht worden, die den Ländern Europas als Folge des Wetttrüstens zwischen den USA und der UdSSR einen wachsenden wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Rückstand gegenüber den beiden Supermächten prognostizierten.¹³⁸

Zu der Debatte um die »wissenschaftlich-technologische Lücke« trat dann kurze Zeit später die von den beiden NATO-Tagungen von 1968 und 1969 ausgelöste Diskussion um die Softwarekrise hinzu, durch die sich nicht nur im militärischen Bereich ein breiter, internationaler Konsens darüber herausbildete, daß sich die Effizienz der Softwareproduktion und die Qualität der Softwareprodukte nur durch den Einsatz exakter wissenschaftlicher Methoden der Programmierung und eine eigenständige Softwaretechnologie steigern ließen (Iburg 1991). Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre standen auch Vertreter der Industrie, wie etwa Frederick P. Brooks, als einer der führenden Mitarbeiter in der Softwareentwicklung der IBM mit seinem Buch über den »Mythos des Mann-Monats« (Brooks 1987), selbstkritisch ein, daß sich die Hersteller mit ihren handwerklichen Methoden der Programmierung in eine Sackgasse manövriert hatten und den Komplexitätsproblemen der Programmierung mit rein arbeitsorganisatorischen Maßnahmen nicht mehr beizukommen war. Die Diskussion um die Softwarekrise und die Erwartung, diese Krise lasse sich durch formalwissenschaftliche Methoden lösen, führten am Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre dann in

138 Große Popularität erlangte die These von der wissenschaftlich-technologischen Lücke durch das Buch von Jean-Jaques Servan-Schreiber über die »Amerikanische Herausforderung« (Servan-Schreiber 1968).

fast allen westlichen Industrienationen dazu, daß sich die Informatik zumeist im Zuge spezieller staatlicher Förderprogramme und unter zum Teil noch unterschiedlichen Bezeichnungen als eigenständige akademische Disziplin etablieren konnte.

Kapitel 6

Entwicklungslinien der Informatik und Normierungsprobleme der Softwaretechnik

6.1 Vielfalt und Heterogenität – das Dilemma der Informatik und die Normierung der Softwaretechnik

Die Hoffnungen und Erwartungen, die sich am Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre mit der Institutionalisierung der Informatik als eigenständiger akademischer Disziplin verbanden, sind weitgehend enttäuscht worden. Die Informatik hat zu keiner Zeit eine Führungsrolle gegenüber der Softwaretechnik einnehmen können und ist rund ein Vierteljahrhundert nach ihrer Institutionalisierung als akademische Disziplin weiter denn je von dem Ziel entfernt, diese Technik zu vereinheitlichen und zu normieren.

Auch die Softwarekrise dauert unvermindert an. Die Systeme sind nach wie vor fehleranfällig und unzuverlässig. Schätzungen gehen davon aus, daß das Verhältnis der Produktions- und Wartungskosten etwa eins zu vier beträgt, die Fehlersuche und -beseitigung also viermal mehr Mittel verschlingt als die Herstellung der Systeme (Birnbaum 1982: 760). Die Programmierung bildet nach wie vor den zentralen »reverse salient« (Hughes 1986) der Informationstechnik, und wenn überhaupt kann mit Blick auf die vergangenen fünfundzwanzig Jahre nur von »unwesentlichen Verbesserungen der Softwareproblematik« (Pflüger 1994: 253) die Rede sein. Spillner spricht sich mit Teichroew denn auch dafür aus, den Begriff der Softwarekrise angesichts der nach wie vor geringen Qualität und hohen Fehleranfälligkeit der Softwareprodukte endlich ad acta zu legen: »Since the condition has persisted since the early days of computer usage in the fifties, it is more appropriate to consider the affliction as ›chronic‹ rather than a ›crisis‹« (Teichroew, zitiert nach Spillner 1994: 52).

Trotz aller Bemühungen um die »Verwissenschaftlichung« der Programmierung führt die Softwaretechnik auch heute noch ein weitgehend unabhängiges »Eigenleben« (Heidelberger 1993: 26) von der Informatik. Sie ist

ein Handwerk geblieben, das eine hohe »Resistenz gegen Vereinheitlichung« (ebd.: 26) durch die Informatik und gegenüber wissenschaftlichen Methoden der Programmierung aufweist. Am deutlichsten wird dies noch am Beispiel der Programmiersprachen als dem Kerngebiet der informatischen Forschung. So sehr ALGOL die Entwicklung der wissenschaftlichen Programmierung beeinflußt hat, so wenig Bedeutung kam ihr in der softwaretechnischen Praxis zu. Auch keine andere wissenschaftliche Programmiersprache ist je über den Bereich der akademischen Forschung und Lehre hinausgekommen, und nicht einmal Pascal hat eine nennenswerte praktische Bedeutung erlangt. Die heutigen Standardsprachen der Softwaretechnik werden nach wie vor von den ältesten Sprachen FORTRAN und COBOL (Common Business Language) sowie C gebildet. Sind FORTRAN und COBOL bereits »hoffnungslos veraltet« (Rechenberg 1991: 111), so gilt dies aus informatischer Sicht gleichermaßen für das »merkwürdige Phänomen« C (ebd.: 112). Wie FORTRAN und COBOL ist auch C alles andere als eine moderne wissenschaftliche Hochsprache. Diese Programmiersprache wurde zu Beginn der sechziger Jahre entwickelt und ist »konzeptionell eigentlich so indiskutabel wie FORTRAN« (ebd.: 112).

Die chronische Misere der Softwaretechnik geht jedoch nicht auf akzidentielle Gründe zurück, wie dies die häufigen Klagen von Vertretern insbesondere der theoretischen Informatik wie Dijkstra, Hoare oder Parnas über das mangelnde professionelle Bewußtsein der Praktiker nahelegen, sondern hat essentielle Ursachen. Informatik und Softwaretechnik kranken, wenn man so will, gleichermaßen an der überschießenden Vielfalt der theoretischen und methodischen Deutungs- und praktischen Anwendungsmöglichkeiten des Computers. Die Vielfalt dieser Möglichkeiten hat es nie zugelassen, den Computer auf ein bestimmtes Standardset von Theorien und Methoden zu reduzieren, die als Normen für die technische Praxis hätten fungieren können.

Der Übergang zu den formalen Sprachen und abstrakten Maschinenmodellen, wie er von ALGOL eingeleitet wurde, hat die Softwaretechnik zwar von der Komplexität der maschinenorientierten Assemblertechnik und gewissermaßen von den niederen Details der Hardwaresysteme befreit, aber zu »keinen vereinheitlichenden Prinzipien« der Programmierung (Pflüger 1994: 253) geführt. Glaubte man anfangs, die Programmierung auf einige wenige abstrakte und formale Prinzipien zurückführen zu können, so tat sich gerade durch ihre konzeptionelle Ablösung von den physikalischen Maschinen und den Weg in die Abstraktion eine »ungeheure Spanne von konzeptuellen Hierarchien auf, die mit einer Vielzahl von Beschreibungsebenen verbunden sind« (ebd.: 251).

So induzierte gerade das Erscheinen von ALGOL nicht nur die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Programmierung, sondern ebenso die »Proliferation der Programmiersprachen« (Knuth/Pardo 1980: 198) und den Beginn der »babylonischen Sprachverwirrung« (Sammet 1969) in der Informatik und Informationstechnik. Nach dem Bericht von 1958 kam es in kürzester Zeit zu einer Flut von Dialekten und Derivaten von ALGOL, durch die der Konsens über die Definition der Sprache zerbrach und die es verhinderte, daß je eine verbindliche und »endgültige« Sprachversion entstand. Das Schicksal von ALGOL stand damit bereits exemplarisch dafür, daß die Mechanismen der kooperativen, auf Verhandlungen und Vereinbarungen basierenden Standardisierung in der Softwaretechnik und Informatik weitgehend versagen.

Diese Form der Standardisierung erwies sich als ein um so schwächeres Instrument, als sich mit den enormen Fortschritten in der Mikroelektronik zugleich immer neue Anwendungsmöglichkeiten des Computers eröffnet haben. Mit der faktischen und später auch konzeptionellen Emanzipation der Programmierung von den physikalischen Maschinen ist die Computer Science eine »Koevolution« (Ceruzzi 1989) mit der Elektronik eingegangen. Die Verselbständigung und Ausdifferenzierung der Programmierung zur Softwaretechnik hat die Elektronik von den Anwendungen des Computers entlastet und es ihr ermöglicht, sich auf die Entwicklung immer kleinerer, leistungsfähigerer und preiswerterer Prozessoren zu spezialisieren. Als Folge dieser Spezialisierung sind die Hardwarekapazitäten und damit die programmiertechnischen Möglichkeiten seit dem Beginn der siebziger Jahre in geradezu explosionsartiger Weise angestiegen, während zugleich die Großrechenanlagen und Rechenzentren im Verlauf der siebziger und achtziger Jahre durch Arbeitsplatzcomputer und dezentral verteilte und vernetzte Systeme abgelöst wurden.

Die Softwaretechnik ist damit in eine völlig unüberschaubare Vielfalt immer komplexerer Anwendungen vorgedrungen und dem Stand des wissenschaftlichen Wissens über das korrekte Design der Systeme heute weit vorausgelaufen. Softwaretechnisch läßt sich sehr viel mehr realisieren, als formal und mathematisch erklärbar ist. Die Softwaretechnik entwickelt sich nach wie vor und weitgehend unabhängig von der Informatik durch »bricolage« und experimentelles Konstruieren und läßt dabei, wie keine andere Technik, mit der Logik als immateriellem und »unendlich formbare[m]« (Brooks 1995: 360) Baustoff der Systeme idiosynkratische Lösungen zu. Der ganz überwiegende Teil der Anwendungen entsteht nicht »top down« in der Wissenschaft, sondern geht »bottom up« aus der programmiertechni-

schen Praxis hervor, in der immer neue Verzweigungen entstehen und unabhängig voneinander immer neue Anwendungs-, Kombinations- und Konstruktionsmöglichkeiten entdeckt werden. Die Softwaretechnik evolutioniert ungesteuert und ihre Entwicklung hängt zudem in starkem Maße von kontingenten und fluktuierenden wirtschaftlichen und politischen Entscheidungen ab, mit denen nicht selten auch ungesichertes technisches und methodisches Neuland betreten wird.

Konnte man am Beginn der siebziger Jahre noch davon ausgehen, daß die Informatik auf dem Wege zu einer kumulativen Normalwissenschaft war, die sich im Sinne des organisationssoziologischen Schemas von Whitley mit einem zunehmend zuverlässigeren Standardset von Theoremen und Methoden einer immer besser definierbaren Klasse von Forschungsproblemen näherte, so wurde ihr dieser Entwicklungspfad durch den rasanten Anstieg der programmiertechnischen Möglichkeiten versperrt. Eine informatische Konstruktionslehre für den Entwurf und die Entwicklung softwaretechnischer Systeme ist nicht in Sicht. Mit den wachsenden Verarbeitungskapazitäten der Maschinen hat die Informatik vielmehr auch selbst eine überschießende Vielfalt von neuen theoretischen und methodischen Konzepten hervorgebracht. Als physikalische Maschine besitzt der Computer für die Elektronik eine ähnliche Funktion wie der Reaktor für die Kernphysik. Als abstrakte Maschine, als die ihn die Informatik behandelt, hat er sich jedoch zu einem immer multivalenteren Phänomen entwickelt und sich theoretisch und methodisch nie fixieren lassen. War die Frage »what is a computer, or what should it be« (Mahoney 1991: 349) bereits von Beginn an umstritten, so laufen die Auffassungen, wie er als abstrakte Maschine zu behandeln ist, heute mehr denn je auseinander.

Als Folge des Mangels an einheitlichen formalen Prinzipien der Programmierung und der Vielfalt der theoretischen und methodischen Möglichkeiten des Designs softwaretechnischer Systeme spielen Normungsorganisationen und korporative Akteure in der Standardisierung der Softwaretechnik kaum eine Rolle. Die Informationstechnik wird heute von einem weltweiten Netz eng miteinander verflochtener Normungsorganisationen überzogen.¹³⁹ Aber

139 Die meisten und wichtigsten dieser Organisationen sind nationalen und internationalen Einrichtungen wie dem American National Standards Institute (ANSI) oder dem Deutschen Institut für Normung (DIN) bzw. IFIP oder der International Standardization Organization (ISO) angegliedert (Genschel/Werle 1993). Mit der »Hochzeit« der Informationstechnik und Telekommunikation am Beginn der siebziger Jahre haben auch Organisationen wie das Consultative Committee for Telephone and Telegraph (CCITT) zunehmend die Aufgabe übernommen, softwaretechnische Normen zu schaffen. Darüber

die Arbeit dieser Organisationen hat nur einen geringen Einfluß auf die faktischen Prozesse der Standardisierung in der Softwaretechnik. Zunächst einmal haben die Komiteestandards keinen verbindlichen Charakter. Sie laufen lediglich auf Empfehlungen hinaus, die sich nur in dem Maße durchsetzen, wie sie von den Anwendern als vorteilhaft akzeptiert werden. Doch ganz abgesehen von ihrer Unverbindlichkeit leidet diese Form der Normierung grundlegend unter dem Mangel an konsensfähigen wissenschaftlichen Kriterien für die Definition von Standards.

Zugleich aber ist die Softwaretechnik eine genuine Netzwerktechnik mit hohen positiven Netzwerkexternalitäten. Der Nutzen einer Programmiersprache steigt in dem Maße an, je mehr Anwender sich ihrer bedienen, und ein Betriebssystem ist von um so höherem Wert, je mehr es erlaubt, Programme und Daten auszutauschen und auf Softwarebibliotheken zurückzugreifen. Dementsprechend bestand in der Softwaretechnik von Beginn an ein hoher Bedarf an koordinativen Standards, der zudem mit der rasanten Verbreitung der Maschinen und ihrer zunehmenden Vernetzung seit dem Anfang der siebziger Jahre immer stärker anstieg.

Dieser hohe Bedarf an koordinativen Normen und der gleichzeitige Mangel an wissenschaftlichen Konsenskriterien für das Design der Softwaresysteme haben zur Folge, daß sich die Arbeit der Normierungskomitees meist an bereits praktizierten Lösungen orientiert, in die ein Teil der Anwender schon investiert hat und in die »sunk costs« eingeflossen sind. Die Funktion der Komiteestandardisierung besteht damit häufig nur darin, faktische Normen post hoc zu ratifizieren. Wo es dagegen darum geht, Normierungsvorschläge ex ante auszuarbeiten, ziehen Konflikte als Folge der vielfältigen theoretischen und methodischen Möglichkeiten des Designs der Systeme die Verhandlungen der Komitees wiederum zumeist soweit in die Länge, daß sich bereits ein faktischer Standard etabliert hat, wenn sie mit ihren Lösungen aufwarten können. Außerdem sind diese Lösungen in der Regel von

hinaus engagiert sich auch eine Vielzahl von wissenschaftlichen und beruflichen Verbänden wie das Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) oder die Association for Computing Machinery (ACM) auf dem Gebiet der softwaretechnischen Normung. Die Organisationsformen, Verfahrensweisen und Mitgliedschaftsregeln der Standardisierungsgremien sind sehr unterschiedlich. Ihre gemeinsamen Merkmale bestehen aber darin, daß die Mitarbeit in ihnen freiwillig erfolgt und sie nicht nur Vertretern der Wissenschaft, sondern grundsätzlich allen »interessierten Kreisen« aus Wirtschaft und Politik offenstehen. Der Beschluß einer Norm erfordert dabei in der Regel Einstimmigkeit und den Konsens der Komiteemitglieder (vgl. zur Funktionsweise der Komiteestandardisierung in der Telekommunikation ausführlich Genschel 1995).

Abbildung 2 Auszahlungsmatrix »Battle of the Sexes«

		Spieler B	
		a	b
Spieler A	a	(4,3)	(2,2)
	b	(1,1)	(3,4)

Quelle: Schmidt/Werle 1994: 439

zweifelhaftem wissenschaftlichem und praktischem Wert, da sich der Konsens der Komiteemitglieder meist nur dadurch erkaufen läßt, daß konkurrierende und inkonsistente Konzepte in den Normierungsvorschlag eingehen.

Wie neuere Untersuchungen zu den Standardisierungsprozessen in der Telekommunikation herausgearbeitet haben, entsprechen diese Prozesse in ihrem Grundmuster dem spieltheoretischen Modell des »Kampfes der Geschlechter« oder »battle of the sexes«. ¹⁴⁰ Dieses Modell beschreibt eine soziale Situation, in der es für zwei Akteure von Vorteil ist, wenn sie ihre Aktivitäten koordinieren, der Koordinationsgewinn hingegen nicht gleich verteilt ist. In seiner Auszahlungsmatrix stellt sich das Spiel wie in der Abbildung 2 dar. Spieler A bevorzugt den Standard a, in den er bereits investiert hat, stünde aber schlechter, wenn es gar keinen Standard gäbe. Gleiches gilt für Spieler B und seine Präferenz b. Das Spiel hat also zwei gleichwertige Äquilibrien und keine endogene Lösung, sondern wird durch exogene Einflüsse entschieden. ¹⁴¹

140 Vgl. dazu ausführlicher Farrell/Saloner (1988), Genschel/Werle (1993), Schmidt/Werle (1994, 1995, 1998), Genschel (1995).

141 In seiner ursprünglichen Version beschreibt das Spiel die Situation eines Paares, das den Abend gemeinsam verbringen möchte. Während er es als leidenschaftlicher Fußballanhänger bevorzugt, ins Stadion zu gehen, zieht sie jedoch die Oper vor. Beiden wäre der Abend aber gründlich verdorben, wenn sie getrennt ins Stadion bzw. in die Oper gehen müßten.

Schmidt und Werle zufolge (1994: 430–433) oszilliert die Komiteestandardisierung zwischen Nullsummen- und reinen Koordinationsspielen. Nullsummenspiele stellen sich ein, wenn beide Akteure bereits in verschiedene Standards investiert haben und sich »an den relativen Gewinnen und Verlusten orientieren« (ebd.: 431). Es ist dann wahrscheinlich, daß die Komiteemitglieder sich auf keinen Standard einigen können. Sind die relativen Gewinne und Verluste dagegen ungleich verteilt, hat also einer der Akteure bereits in einen bestimmten Standard investiert, während andere noch keine »vested interests« besitzen, wird sich der »Kampf der Geschlechter« zugunsten der Lösung entscheiden, in die bereits »sunk costs« eingegangen sind. Hat dagegen noch niemand in einen Standard investiert, ist es Schmidt und Werle zufolge möglich, daß sich der »Kampf der Geschlechter« in ein reines Koordinationsspiel wandelt. »Die Kommunikation über unterschiedliche Vorschläge ist dann weniger ein Aushandlungsprozeß als die Verständigung auf einen Vorschlag« (ebd.: 431).

Tatsächlich jedoch scheitern solche Diskurse in der Softwaretechnik häufig. Gerade wenn die Komitees nicht unter dem Druck stehen, sich auf bereits praktizierte Lösungen zu einigen und einen Standard ex ante zu definieren haben, brechen schnell langwierige theoretische und methodische Kontroversen auf, deren Beilegung meist mehr Zeit benötigt, als dies der hohe Koordinationsbedarf in der Softwaretechnik zuläßt. Hier bestehen in der Regel nur sehr kleine Zeitfenster von wenigen Monaten oder Jahren, die sich für gewöhnlich bereits geschlossen haben, wenn die Standardisierungskomitees zu bestimmten Vorschlägen gelangt sind.¹⁴² Zudem geraten die Verhandlungsprozesse, wenn es darum geht, einen Standard ex ante festzulegen, in der Softwaretechnik leicht zu einer Art »package deal«, bei dem Meinungsverschiedenheiten unter den Komiteemitgliedern nach dem Verfahrensgrundsatz ausgeräumt werden: »Akzeptierst Du meine Spezifikation, akzeptiere ich Deine Spezifikation« (Interview II). Das Resultat dieser Art der Konsensfindung besteht dann gewissermaßen in hypertrophen Lösungen, mit denen allen gedient wurde, die aber kaum jemandem nutzen und rasch wieder aussterben. Folglich haben bislang alle Versuche, eine einheitliche Programmiersprache zu schaffen und als Standard zu etablieren, zu überkomplexen »Elefantensprachen« (Rechenberg 1991: 112) geführt, die in der Praxis keine Akzeptanz fanden.

142 Farrell und Saloner schließen daraus, daß es von Vorteil ist, wenn Komitees in ein »hybrides Spiel« involviert sind, bei dem durch Zeitlimits Elemente der Aushandlung mit Bandwagoneffekten kombiniert werden (Farrell/Saloner 1988: 246–249).

Als Folge des weitgehenden Versagens der Komiteestandardisierung bilden sich die Normen der Softwaretechnik so gut wie ausschließlich durch reine Bandwagonprozesse und nicht-kooperative, häufigkeitsabhängige »Lock-in-Effekte« heraus, die durch »historical events« (Arthur 1989) ausgelöst werden und zu einer pfadabhängigen Fixierung von bestimmten Konventionen führen. Diese Konventionen sind unter wissenschaftlich-technischen Gesichtspunkten meist nach kurzer Zeit bereits veraltet und in starkem Maße suboptimal. Dennoch entfalten sie in der Regel eine enorme Schwerkraft und erweisen sich meist auch dann als resistent gegenüber Veränderungen, wenn wesentlich effizientere Lösungen zur Verfügung stehen.

Ist der Kampf der Geschlechter durch Bandwagonprozesse und wechselseitige Anpassungen an bestimmte Lösungen einmal entschieden, entsteht eine stabile Gleichgewichtssituation, die niemand individuell verlassen kann, ohne die Vorteile der positiven Netzwerkeffekte preiszugeben, die durch eine koordinative Norm entstehen. In dem Maße, wie dann »sunk costs« in solche Normen eingehen und sie mit der installierten Basis von Softwaresystemen zusammenfallen, entstehen immer höhere Hindernisse für einen Neubeginn und den Wechsel auf alternative Techniken. Der Weg »nach oben« führt in der Softwaretechnik somit nicht über Revolutionen, sondern über inkrementelle Modifikationen und Erweiterungen der installierten Basis, mit denen veraltete und suboptimale Techniken auf unbestimmte Zeit mitgeschleppt werden.¹⁴³

Scheitert die Normierung der Softwaretechnik durch die Informatik bereits an dem Mangel an vereinheitlichenden formalen Prinzipien, so ist mit der Migration des Computers aus den Rechenzentren und dem Vordringen dieser Technik in immer neue Anwendungsbereiche zudem auch immer deutlicher hervorgetreten, daß viele grundlegende Fragen der Programmierung gar keine formalen Fragen sind. Die Informatik verfügt über formales »know-how«, nicht aber über das erforderliche »know-why« für die Entwicklung von Softwaresystemen (ähnlich: Pflüger 1994). Ob es sich um die Kontrolle und Steuerung von Kernreaktoren oder um die Automatisierung von bürokratischen Vorgängen handelt: immer setzt die Modellierung der entsprechenden Systeme anwendungsspezifische Wissenskomponenten und eine vom formalen Instrumentarium der Informatik zunächst einmal unabhängige Theorie des Gegenstandsbereichs voraus. Dies hat die Software-

143 Hypothetisch dürften hierarchisch verordnete Standards die höchste Effizienz aufweisen, da sie nicht nur die größte Einheitlichkeit garantieren könnten, sondern mit dem Wandel des Wissens auch von Zeit zu Zeit reversibel wären (Farrell/Saloner 1988).

technik nicht nur in ein immer breiteres Spektrum von Anwendungen, sondern ebenso immer tiefer in die Komplexität des Einzelfalls geführt (Frederichs 1995). Statt den Weg in die Abstraktion einschlagen zu können, wurden die Entwickler der Systeme mit der Notwendigkeit konfrontiert, sich immer intensiver mit speziellem und kontextspezifischem Wissen auseinandersetzen zu müssen.

Die Notwendigkeit zur »Vertiefung« der Programmierung in den jeweiligen Spezialfall hat vor allem die Renaissance und das erneute Scheitern der KI-Forschung in Form der Expertensystemtechnik und des Wissensengineering im Verlauf der achtziger Jahre gezeigt (Ahrweiler 1995a, 1995b). Wie viele andere Forschungsthemen der Informatik ging auch die Renaissance der KI-Thematik nicht aus der Wissenschaft hervor, sondern wurde durch wirtschaftliche und forschungspolitische Entscheidungen induziert. Mit dem »knowledge engineering« glaubte man über eine Technologie zu verfügen, die es erlaubte, auf Fachwissen beruhende menschliche Intelligenzleistungen »akquirieren« und maschinell simulieren zu können. Es stellte sich allerdings sehr rasch heraus, daß es zu den schwierigsten und anspruchsvollsten Aufgaben der Programmierung überhaupt gehört, die inhaltlichen Anforderungen an die Systeme zu generieren, da auch Experten stets nur über vages und unscharfes Wissen verfügen. Was als eine universelle Technologie gedacht war, führte in die Detailarbeit und zur Entwicklung von fallbezogenen Näherungslösungen. Wie gerade am Beispiel der Wissensverarbeitung deutlich wird, ist die Programmierung nur zum Teil eine formale und über weite Strecken eine genuin empirische Technik, die hohe Anforderungen an die sozialen und hermeneutischen Kompetenzen der Entwickler stellt und wie kaum eine andere Technik auf die Kooperation mit ihren Anwendern angewiesen ist.

Angesichts der unvorhergesehenen Entwicklungsdynamik der Softwaretechnik und der Rückschläge, die das Fach in den vergangenen Jahrzehnten erlitten hat, ist auch die Frage »Was ist Informatik« (Bauer 1974) am Ende der achtziger Jahre neu aufgeworfen worden. Die Disziplin bietet heute das Bild eines amorphen und wenig integrierten Forschungsfeldes, das seine zentralen und zentrierenden Forschungsthemen weitgehend verloren hat und dessen Entwicklung in starkem Maße allonom und »von außen nach innen« bestimmt wird. Ebenso wird seine Identität als formale Strukturwissenschaft, über die am Ende der sechziger Jahre noch breiter Konsens bestand, heute zunehmend bestritten. In der innerinformatischen Diskussion um die Identität und die Aufgaben des Fachs setzt sich derzeit in wachsendem Maße eine Position durch, die seine duale Struktur und Doppelidentität als for-

male und empirisch-hermeneutische Disziplin betont (Coy 1992a, 1992b, 1994a, 1994b, 1994c) und dem traditionellen linearen Modell der Softwareentwicklung evolutionäre, iterative und partizipative Modelle gegenüberstellt (Floyd 1987, 1995). Die Vorstellung von der Informatik als einer »harten« Wissenschaft weicht damit heute dem Bild einer »weichen« Disziplin, die nicht mehr das Ziel einer exakten, sondern einer approximativen Beschreibung der Welt verfolgt.

Wie bereits die vergangenen Abschnitte zur Entstehung des Computers und der Informatik beabsichtigen auch die nun folgenden Ausführungen über die Entwicklung dieses Fachs nicht, eine Geschichte der Informatik zu schreiben. Mit ihnen sollen vielmehr die typischen Muster herausgearbeitet werden, die ihre Entwicklung bestimmt haben. Im Anschluß an diese Darstellung kann dann zugleich deutlich werden, daß und warum die Organisationsform der Großforschung in der Informatik und Informationstechnik weitgehend versagt und das Modell der anreizfinanzierten Vertragsforschung und forschungspolitischen Kontextsteuerung diesem Feld wesentlich angemessener ist.

6.2 Wildwuchs der Programmiersprachen und frühe Muster der Standardisierung in der Datenverarbeitung

6.2.1 Das ALGOL-Drama

Die grundlegenden Schwächen der Komiteestandardisierung in der Datenverarbeitung und Informationstechnik offenbarten sich bereits bei dem Versuch, ALGOL als internationale Standardsprache zu etablieren. Obwohl diese Programmiersprache in der Fachwelt geradezu begeistert aufgenommen und von einflußreichen Organisationen wie der ACM und Share unterstützt wurde, versank sie bereits um die Mitte der sechziger Jahre in Bedeutungslosigkeit. Dabei ging der Niedergang von ALGOL gerade darauf zurück, daß diese Sprache der Programmierung gewissermaßen mit einem Schlag völlig neue theoretische und methodische Perspektiven eröffnete, die zu einer zunehmend kontroversen und langwierigen Debatte darüber führten, wie ihr Design noch zu verbessern sei, während sich FORTRAN unterdessen zum De-facto-Standard entwickelte. Endgültig zu Grabe getragen wurde der Sprachentwurf dann von seinen eigenen Entwicklern, die ihn in der Folge der sich neu eröffnenden theoretischen und methodischen Perspektiven zu

einem überkomplexen Werkzeug ausweiteten, das selbst unter den engagiertesten Verfechtern von ALGOL keine Akzeptanz mehr fand.

Der gescheiterte Versuch, ALGOL als Standardsprache zu etablieren, wird meist darauf zurückgeführt, daß IBM diese Programmiersprache nicht unterstützt und schlicht seine Marktmacht dazu genutzt habe, um FORTRAN als proprietären Standard durchzusetzen (Bauer o.J.: 8). Aber so einfach lagen die Dinge auch für die IBM nicht.¹⁴⁴ Die IBM geriet mit dem Erscheinen des ALGOL-58-Berichts in eine durchaus ambivalente Situation. Fraglos besaß das Unternehmen zum einen eine hohe Präferenz für FORTRAN und ein großes Interesse daran, dieses unternehmenseigene Produkt als Standard zu etablieren. Zum anderen aber konnte es nicht rundweg ablehnen, ALGOL als Standard zu übernehmen, da FORTRAN erhebliche Kritik unter den Anwendern auf sich zog, während der schweizerisch-deutsche Sprachentwurf große internationale Anerkennung genoß und nach der »historischen« Konferenz in Zürich die volle Unterstützung der ACM und der Nutzerorganisation SHARE erhielt.

IBM geriet damit unter einen erheblichen Druck, FORTRAN fallen zu lassen, zumal sich John Backus als Entwickler dieser Programmiersprache und führender Mitarbeiter in der Forschung und Entwicklung des Unternehmens ausdrücklich gegen sein eigenes Produkt wandte und SHARE dazu aufforderte, ALGOL zu unterstützen. Nur wenige Tage nach der Konferenz von Zürich empfahl Backus in seiner Eigenschaft als Mitglied des ACM-Komitees der Anwendervereinigung SHARE, ALGOL als Standard zu übernehmen:

I want to urge SHARE to consider giving official recognition to the language proposed here. I do so because I am convinced that this is fundamentally sound, that no better language is likely to be approved in the near future by any international group representing the outstanding computer societies of the United States and the Continent.

(John Backus to SHARE, zitiert nach Bemer 1969: 164)

144 R.W. Bemer, ein führender Mitarbeiter der IBM und überzeugter »ALGOLianer«, hat die Auseinandersetzungen zwischen der IBM, ACM, SHARE und den europäischen Wissenschaftsorganisationen um ALGOL in der Zeitschrift »Annual Review in Automatic Programming« unter dem Titel »A Political-Social History of ALGOL in the Form of a Log Book« dokumentiert (Bemer 1969). Mit dieser Dokumentation steht eine umfassende, aber bislang kaum beachtete Quelle zum Verlauf des ersten Versuchs, die Softwaretechnik auf internationaler Ebene zu standardisieren, zur Verfügung. Die hier wiedergegebene Rekonstruktion dieses Versuchs beruht im wesentlichen auf einer inhaltsanalytischen Auswertung des »Logbuchs« von Bemer.

SHARE folgte der Empfehlung von Backus und beschloß »to take positive action to study the proposed International Algebraic Language and to implement its adoption as a SHARE standard« (Bemer 1969: 164). Die Anwenderorganisation setzte ein »SHARE ALGOL Committee« ein, das seinerseits eine Resolution verabschiedete, in der die IBM aufgefordert wurde, mit dem Bau eines ALGOL-Compilers zu beginnen und zugleich die Weiterentwicklung von FORTRAN einzustellen, um zu verhindern, daß sich der Kreis der Benutzer dieser Sprache ausdehnte.¹⁴⁵ Da FORTRAN ebenfalls in den USA noch nicht den Status eines industriellen Standards besaß und außerdem zu erwarten war, daß sich ALGOL auf dem gerade entstehenden europäischen Computermarkt rasch durchsetzen würde, konnte sich die IBM dieser Forderung nicht entziehen. An den Universitäten und Hochschulen in Europa stand es so gut wie fest, daß ALGOL den künftigen Standard bilden sollte. Doch auch die europäische Privatwirtschaft zeigte großes Interesse an dieser Programmiersprache. Dies bewies nicht zuletzt die Gründung der internationalen Interessenorganisation ALCOR¹⁴⁶ im Jahr 1959, die sich zum Ziel gesetzt hatte, den Bau von ALGOL-Compilern zu koordinieren. Ihr gehörten hauptsächlich große europäische Unternehmen an. »Europa wartete darauf«, ALGOL als Standard zu übernehmen (Petzold 1985: 500).

Angesichts der breiten internationalen Unterstützung, die ALGOL erfuhr, votierten die IBM World Trade und IBM Europe eindeutig für ALGOL, während sich innerhalb der amerikanischen Muttergesellschaft zumindest eine einflußreiche Minderheit von »ALGOLianern« um Backus und andere hochrangige Mitarbeiter des Unternehmens für diesen Sprachentwurf einsetzte. Alles in allem war damit die Frage, ob sich ALGOL oder FORTRAN als Industriestandard durchsetzen würde, 1958 noch nicht entschieden, und die konzeptionellen Vorteile des von der ACM und SHARE favorisierten Sprachentwurfs gegenüber dem Produkt der IBM sprachen eher für einen Sieg von ALGOL. Die IBM hielt sich beide Optionen offen. Das Unternehmen fuhr zwar mit der Weiterentwicklung von FORTRAN fort und lieferte noch 1958 mit FORTRAN II eine neue Version der Sprache aus, entwickelte jedoch zugleich, der Forderung von SHARE entsprechend, einen Experimentalcompiler für ALGOL und kündigte einen offiziellen Übersetzer für

145 »In Order to implement the creation of a working language, SHARE recommends that IBM begins development of an IAL translator; and that for FORTRAN an IAL Committee be directed jointly to set a date for terminating modifications and extensions to the FORTRAN language« (SHARE, zitiert nach Bemer 1969: 165–166).

146 Abgeleitet von ALGOL-Converter.

den Zeitpunkt an, zu dem eine verbindliche Version der Sprache zur Verfügung stand.¹⁴⁷

Wenn das Pendel dann kurze Zeit später für FORTRAN ausschlug und sich die IBM-eigene Entwicklung als Standard durchsetzte, so war dies hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß es nie zu einer verbindlichen Version von ALGOL kam und als Folge der Diskussion, die der Bericht von 1958 auslöste, geradezu explosionsartig immer neue Dialekte und Derivate dieser Sprache wie MAD, JOVIAL oder NELIAC entstanden.¹⁴⁸ Dieser inflationäre Wildwuchs der Modifikationen und Erweiterungen von ALGOL hatte zur Folge, daß das Design der angestrebten verbindlichen Sprachversion in wachsendem Maße kontrovers wurde und sich die Diskussion des Sprachentwurfs von 1958 in die Länge zog. Mit der Zahl derer, die sich zu Wort meldeten, wuchs auch die Heterogenität der Beiträge. Die Diskussion litt zunehmend an »überquellenden Ideen« (Bauer o.J.: 8), und die im Juni 1959 von der UNESCO bzw. IFIP in Paris ausgerichtete ALGOL-Konferenz war durch »heftige Debatten« (ebd.: 7) gekennzeichnet.¹⁴⁹

Viele Teilnehmer, darunter Wilkes, sprachen sich auf dieser Konferenz außerdem auch grundsätzlich dagegen aus, eine einheitliche Standardsprache einzuführen. Standards, so Wilkes, seien sicher nützlich, »but to suggest that standardization should mean the selection of one particular language to be used on all occasions, in preference to all others, appears to me to betray a very superficial knowledge of the subject« (Wilkes, zitiert nach Bemer 1969: 199). Aber auch in den Reihen von SHARE kamen angesichts der vielfältigen Möglichkeiten, die sich auf dem Gebiet der Programmiersprachen aufboten, bereits erste Zweifel an der »universal acceptance« von ALGOL auf.¹⁵⁰ Der Vorsitzende der Anwenderorganisation vermutete, daß sich künftig möglicherweise eine Vielzahl von Sprachen entwickeln werde, »for aerodynamists, petroleum engineers, nuclear physicists, medical diagnosticians, clothing manufacturers, etc. Even if this were not technically sound«.¹⁵¹

147 Remarks by A. L. Harmon to SHARE XIV, wiedergegeben in Bemer (1969: 172–173).

148 Einen Überblick über die in der kurzen Zeit nach dem ALGOL-58-Bericht entstandenen Sprachen gibt Sammet (1969). Sammet diskutiert rund einhundertzwanzig verschiedene Entwürfe, ohne den Anspruch zu erheben, daß seine Auflistung vollständig wäre. Die meisten dieser Sprachen verschwanden ebenso rasch wieder, wie sie auftauchten. Zum Teil enthielten sie aber auch neue theoretische Denkmodelle und methodische Konzepte, die in die spätere Entwicklung der Programmiersprachen eingeflossen sind.

149 Man warf sich »mit Feuereifer auf ALGOL« und suchte »unbekümmert nach Verbesserungen« (Bauer o.J.: 7).

150 Francis V. Wagner, Chairman of SHARE, zitiert nach Bemer (1969: 163).

151 Francis V. Wagner, Chairman of SHARE, zitiert nach Bemer (1969: 163).

Während sich die Debatte um ALGOL in die Länge zog, wurde FORTRAN benutzt. Trotz all ihrer Defizite und selbst zur Verwunderung ihrer Entwickler setzte ein ständig wachsender Anwenderkreis die Sprache für praktische Problemlösungen ein, obwohl es anfänglich so schien, daß ihre Mängel »would almost completely block acceptance of the system« (Backus, zitiert nach Knuth 1980: 241). Damit stand bereits Ende 1959 eine umfangreiche installierte Basis und wachsende Bibliothek von FORTRAN-Programmen zur Verfügung, die es für die Anwender immer attraktiver werden ließen, sich der »FORTRAN-Gemeinde« anzuschließen (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 28–39). Angesichts dieser Entwicklung warnten die »ALGOLianer« in den Reihen der IBM davor, »that if ALGOL were not developed as rapidly as possible, FORTRAN would become an industry standard by default« (Bemer 1969: 179).

Die zunehmende Zahl von ALGOL-Dialekten und der wachsende Druck, die Kontroversen um ALGOL im Interesse einer einheitlichen Sprachdefinition möglichst rasch zu beenden, führten Anfang 1960 schließlich zur Zweiten Internationalen ALGOL-Konferenz in Paris. Die Konferenz wurde von der IBM World Trade Europe ausgerichtet und umfaßte diesmal neben den Repräsentanten der ACM und GaMM ebenfalls Vertreter wissenschaftlicher Organisationen aus Dänemark, England, Frankreich und den Niederlanden. Das Ziel der ALGOL-Konferenz war, »unter Einbezug aller Pros und Kontras ein »endgültiges« ALGOL zu definieren« (Bauer o.J.: 7). Während die erste Tagung von 1958 in Zürich noch von dem Enthusiasmus und Kooperationswillen aller Beteiligten getragen worden war, gestalteten sich die Verhandlungen in Paris jetzt allerdings wesentlich schwieriger. Die europäischen Konferenzteilnehmer zeigten zwar nach wie vor ein großes Interesse an ALGOL, auf seiten der amerikanischen Delegation hingegen hielt sich die anfängliche Begeisterung für das Projekt jetzt bereits in Grenzen. Außerdem gelang es der Konferenz angesichts der Vielzahl von Änderungsvorschlägen nur unter »beträchtlichem Druck« (Bauer 1994: 8), zu einer Einigung zu kommen. Dabei wurde der Sprachentwurf von 1958 erheblich modifiziert und mit zahlreichen neuen und kontrovers diskutierten Elementen versehen, die nur deshalb die Konsensbereitschaft der Konferenzteilnehmer nicht überforderten, weil ihr vorrangiges Ziel darin bestand, überhaupt zu einem Ergebnis zu kommen (Bauer o.J.: 9). Der Kompromiß bestand schließlich im ALGOL-60-Report, der jetzt die »endgültige« Definition dieser Programmiersprache als internationaler Standardsprache darstellen sollte.¹⁵²

152 Für die Backus jetzt zusammen mit Peter Naur eine syntaktische Beschreibung erarbeitete und die entsprechend als Backus-Naur-Form bezeichnet wurde.

In Europa, wo die Datenverarbeitung noch in den Kinderschuhen steckte, traf ALGOL-60 auch tatsächlich auf große Akzeptanz. Hier sah es nach wie vor so aus, als werde sich diese Sprache fest als internationaler Standard etablieren. Zahlreiche Hochschuleinrichtungen und Computerproduzenten begannen unmittelbar nach dem Erscheinen des Berichts von 1960 mit der Entwicklung von entsprechenden Compilern. Die Einführung von ALGOL wurde in Europa zugleich politisch unterstützt. So war es den öffentlichen Forschungseinrichtungen in Deutschland nur erlaubt, Rechner zu ordern, für die ein ALGOL-Compiler zur Verfügung stand (Bemer 1969: 153). Ähnliche Regelungen bestanden in Holland und Skandinavien und trugen dazu bei, daß sich ALGOL zumindest an den Akademien und Hochschulen zeitweise zu einem europäischen Standard entwickelte (ebd.: 216).

Während der Bericht von 1960 in Europa auf große Resonanz stieß, machte sich dagegen um die gleiche Zeit »in den USA bereits ein lähmendes Desinteresse« (Bauer o.J.: 8) an ALGOL breit. In dem Zeitraum von nicht ganz zwei Jahren, die seit dem ALGOL-58-Bericht und dem Report von 1960 verstrichen waren, hatte sich FORTRAN dort bereits weit verbreitet und war auf dem Weg, sich als nationaler Standard zu etablieren. So lag der Anteil von FORTRAN-Programmen zu Beginn der sechziger Jahre einer Untersuchung in den USA zufolge bei etwa zwanzig, der in ALGOL geschriebenen Applikationen aber bei nicht einmal zwei Prozent (Bemer 1969: 217). Wenn nach der Pariser Konferenz doch noch ein kleines Zeitfenster für ALGOL offen gestanden haben sollte, wovon die ALGOLianer in den Reihen der IBM ausgingen, so schloß sich dieses Fenster jetzt allerdings definitiv durch eine erneute Diskussion um die Definition des Sprachentwurfs, die in den USA nur wenige Wochen nach dem Erscheinen des ALGOL-60-Berichts aufbrach. Zahlreiche Anwendergruppen sprachen sich für Modifikationen und Erweiterungen der Sprache aus, doch auch viele Teilnehmer der Pariser Konferenz selbst waren der Ansicht, »that it would be very desirable to extend ALGOL«¹⁵³ und unterbreiteten konkrete Vorschläge, die in Paris als »endgültig« verabschiedete Version, nochmals zu überarbeiten.

Als Folge der damit neu eingetretenen Ungewißheit über die Definition des Sprachentwurfs und der allmählichen Stabilisierung von FORTRAN als industrielle Norm geriet nun gleichermaßen das Engagement der Anwenderorganisation SHARE für ALGOL zunehmend in Konflikt mit den Interessen ihrer Mitglieder. SHARE begrüßte den neuen Sprachentwurf von 1960

153 J. H. Wegstein to Julien Green, zitiert nach Bemer (1969: 174).

zwar zunächst noch als »substantial improvement over the previous version«¹⁵⁴, sah sich aber mit dem Problem konfrontiert, daß niemand dazu in der Lage war, »to answer the basic question, ›What is ALGOL?‹« (Bemer 1969: 183), während die Mitglieder der Vereinigung in wachsendem Maße auf FORTRAN setzten. Dies machte es nun auch der IBM möglich, ALGOL allmählich die Unterstützung zu entziehen, indem sie den Sprachentwurf von 1960 zu einem noch unfertigen Produkt erklärte, für das sich die Entwicklung von Compilern erst zu einem späteren Zeitpunkt lohnen werde.¹⁵⁵ SHARE versuchte zwar, die Entwicklung eines ALGOL-Compilers selbst in die Hand zu nehmen, war als ein Verband, der freiwillige Mitglieder organisierte, aber auf die Kooperation der Anwender angewiesen, die kaum mehr ein Interesse an dieser Sprache besaßen. Angesichts der bereits weiten Verbreitung von FORTRAN konnte jetzt keine »kritische Masse« mehr für ALGOL entstehen, und das Vorhaben von SHARE scheiterte am klassischen Olsonschen Kollektivgutproblem.¹⁵⁶ Auch die ALGOL-Verfechter der IBM vertraten jetzt mehr und mehr die Auffassung: »Although ALGOL is admittedly a superior language ..., FORTRAN is the present workhorse and is operative in a large number of installations and understood by thousands of people.«¹⁵⁷

Damit war der Niedergang von ALGOL besiegelt, während FORTRAN jetzt zur internationalen Standardsprache aufstieg. SHARE nahm 1961 die Resolution zurück, mit der sie 1958 IBM zur Entwicklung eines offiziellen ALGOL-Compilers aufgefordert und dem Unternehmen zugleich empfohlen hatte, die Weiterentwicklung von FORTRAN einzustellen, um eine Verbreitung dieser Sprache zu verhindern. Die Politik von SHARE kehrte sich jetzt sogar in ihr Gegenteil um. Die Anwendervereinigung wurde im Verlauf der

154 ALGOL Committee Report, SHARE XIV, zitiert nach Bemer (1969: 171).

155 »Since the development of the ALGOL language has not yet reached the point where it seems advisable to expand the manpower required for a full processor that SHARE seems to deserve, based upon the recommendations of the SHARE ALGOL Committee, IBM will not produce an official ALGOL processor at this time. However IBM will continue to support the ALGOL efforts in the areas of language development, translation technics and, of course, processor development« (Remarks by A.L. Harmon to SHARE XIV, zitiert nach Bemer (1969: 172)).

156 Dessen war man sich bei SHARE sehr wohl bewußt: »IBM has so far refused the job. ... The SHARE ALGOL Committee is in need of volunteers – very special volunteers – ones who are willing to work and contribute a non-trivial portion of their time to producing an ALGOL-60 processor« (M.I. Bernstein, Chairman, SHARE ALGOL Committee, to M. Perstein, SHARE Secretary Distribution, 10.8.1960, zitiert nach Bemer 1969: 175).

157 Reply to the De LA Briandais letter by Bob Bemer, zitiert nach Bemer (1969: 179).

folgenden Jahre zu einem entschiedenen Gegner von ALGOL und setzte alles daran, den Status von FORTRAN als Standardsprache abzusichern. SHARE trug ALGOL im Jahr 1965 dann offiziell zu Grabe und setzte das entsprechende Komitee ab.¹⁵⁸

Nachdem SHARE seine Resolution zurückgezogen hatte, erklärte auch IBM die ALGOL-Revolution offiziell als gescheitert und kündigte noch 1961 eine erweiterte Version von FORTRAN an, gab sich in seiner Politik gegenüber ALGOL allerdings wesentlich weniger radikal als die Anwenderorganisation. Mit Blick auf den europäischen Computermarkt und der dort zu erwartenden Verbreitung dieser Programmiersprache führte das Unternehmen die Arbeiten an einem ALGOL-Compiler fort und hielt sich die Option offen, »at some future time« einen offiziellen Übersetzer anzubieten.¹⁵⁹ »Particularly aiming to the needs of the large ALGOL user group in Europe« (Bemer 1969: 218), lieferte die IBM 1967 tatsächlich noch einen solchen Compiler aus. Dies beeinflusste den zu dieser Zeit auch in Europa bereits einsetzenden Niedergang von ALGOL freilich nicht mehr.

Der Versuch der ACM, den Niedergang von ALGOL aufzuhalten, war gleichermaßen zum Scheitern verurteilt. Angesichts der neu entfachten Diskussion um die Sprachdefinition von 1960 richtete die Vereinigung noch im selben Jahr ein »ALGOL Maintenance Committee« ein, das die Wartung der Programmiersprache in den USA übernehmen sollte, und forderte zugleich die GaMM auf, einen entsprechenden Ausschuß auf der europäischen Ebene zu institutionalisieren. Das »ALGOL Maintenance Committee« geriet jedoch rasch in eine schwierige Situation. Die Vertreter der GaMM erklärten sich mit dieser Lösung nicht einverstanden, da sie befürchteten, daß auf diese Weise die einheitliche Definition von ALGOL aufgegeben werde und verschiedene Versionen der Sprache entstünden. Aus der Sicht der GaMM-Gruppe lag die Kompetenz zur Wartung von ALGOL ausschließlich bei den Verfassern des ALGOL-60-Berichts. Dementsprechend bestand sie darauf, daß die Definition von 1960 »word by word as it stands now« beizubehalten sei und forderte die ACM auf, sich den Grundsatz zueigen zu machen: »For several years to come this committee will not propose any changes or additions to the ALGOL language.«¹⁶⁰ Die ACM kam dieser Aufforderung im

158 Eine Mitteilung von SHARE über dieses Begräbnis berichtete, »not a single tear was shed when it was announced that SHARE ALGOL had become part of history« (SHARE XXIV Session Report, 3.3.1965, zitiert nach Bemer 1969: 215).

159 IBM Reply to the Wagner Questionnaire, zitiert nach Bemer (1969: 187).

160 F. L. Bauer and K. Samelson to J. H. Wegstein, zitiert nach Bemer (1969: 177).

übrigen tatsächlich nach, indem sie ein Abstimmungsverfahren wählte, das praktisch jede Modifikation an ALGOL-60 unterband.¹⁶¹

Genau dies allerdings lief den Interessen der Befürworter von ALGOL in den USA entgegen, die nur für den Fall eine Chance sahen, die Programmiersprache als Standard zu etablieren, wenn das ACM-Komitee rasch den Änderungswünschen der Nutzer entgegenkam. So kritisierten vor allem die ALGOLianer in den Reihen der IBM, daß das Komitee als Folge seines Abstimmungsverfahrens »zero output« produziere (Bemer 1969: 188). »It can't change ALGOL and it can't not change ALGOL.«¹⁶² Eine Lösung, die alle Seiten zufriedenstellte, schien dann in der Einrichtung eines internationalen Komitees der IFIP zu liegen, auf das die Wartung der Sprache 1962 überging und das sich aus den Verfassern des ALGOL-60-Berichts und weiteren Wissenschaftlern aus den jeweils nationalen Mitgliedsorganisationen dieses Verbandes zusammensetzte.¹⁶³

Die Einrichtung dieses IFIP-Komitees leitete dann jedoch den letzten Akt des ALGOL-Dramas ein, in dem die Mitglieder dieses Gremiums ALGOL selbst den finalen Todesstoß versetzten. Der erneute Versuch, mit ALGOL-68 eine einheitliche Programmiersprache zu schaffen, scheiterte an der »selbstmörderischen Weise« (Bauer o.J.: 10), mit der das Komitee der IFIP den Entwurf von 1960 zu einer überkomplexen »Elefantensprache« weiterentwickelte.¹⁶⁴ Schon 1962 zerfiel der Ausschuß in zwei konkurrierende Gruppen, die mit ALGOL-X und ALGOL-Y grundlegend verschiedene Nachfolgeversionen des Entwurfs von 1960 favorisierten. ALGOL-X wurde von der Mehrheit des IFIP-Komitees getragen und sah eine stark modifizierte und erweiterte Version von ALGOL-60 vor, die eine Vielzahl der

161 Dem Komitee der ACM konnte im Prinzip jede Organisation »actively engaged in writing programs in the ALGOL-60 language« beitreten (vgl. Bemer 1969: 154) und seine Mitglieder rekrutierten sich etwa zur Hälfte aus Repräsentanten von Hochschuleinrichtungen und der Industrie. Modifikationen an der Sprachdefinition von ALGOL bedurften einer Mehrheit von achtzig Prozent, zugleich reichte ein Zehntel der Stimmen aus, um einen Änderungsantrag zurückzuweisen. U.S. ALGOL Maintenance Group Report, zitiert nach Bemer (1969: 176).

162 Letter from R.W. Bemer to I.L. Auerbach, President of IFIP, 15.8.1961, zitiert nach Bemer (1969: 188).

163 Den entscheidenden Anstoß zur Einrichtung dieses IFIP-Komitees gaben im übrigen IBM-interne Protagonisten von ALGOL, die der Sprache noch immer eine Chance einräumten, wenn es gelang, ihre Wartung aus dem blockierten Komitee der ACM herauszulösen. Vgl. Letter from R.W. Bemer to I.L. Auerbach, President of IFIP, 15.8.1961, zitiert nach Bemer (1969: 188).

164 In den Augen von Friedrich L. Bauer trug »ALGOL-68 mehr als alles andere zum endgültigen Niedergang von ALGOL-60 bei« (Bauer o.J.: 10).

neuen theoretischen und methodischen Konzepte aufnahm, die im Zuge der zahllosen Dialekte und Derivate von ALGOL entstanden waren. Dagegen sollten mit ALGOL-Y, dem Entwurf des Schweizer Niklaus Wirth, nur wenige Veränderungen am ursprünglichen Sprachdesign vorgenommen werden, die vor allem darauf abzielten, die in ALGOL noch enthaltenen Unstimmigkeiten und Mehrdeutigkeiten auszuräumen.¹⁶⁵ Die Auseinandersetzungen zwischen den Verfechtern der beiden Sprachentwürfe steigerten sich in den folgenden Jahren zu einem offenen Konflikt, aus dem ALGOL-X unter der späteren Bezeichnung ALGOL-68 als Sieger und offizielle Sprachversion des IFIP-Komitees hervorging. Wirth dagegen kehrte im Zuge dieses Konflikts dem IFIP-Komitee 1966 den Rücken und veröffentlichte seinen Entwurf als ALGOL-W mit dem Vorbehalt, daß es sich dabei um den »privaten« Vorschlag eines einzelnen Komiteemitglieds handelte.

Der offizielle Bericht des IFIP-Komitees verzögerte sich um zwei weitere Jahre, da die Komplexität des Sprachentwurfs zu vielen Mehrdeutigkeiten und Widersprüchen in ihrer syntaktischen und semantischen Struktur führte, die nicht unter Kontrolle zu bringen waren. Seine Veröffentlichung zog dann den endgültigen Schlußpunkt unter das ALGOL-Projekt. ALGOL-68 wurde mit Enttäuschung als eine »unglückliche Konstruktion« (Rechenberg 1991: 111) aufgenommen und so gut wie nie benutzt. Ebenso schlugen alle Bemühungen, die Programmiersprache zumindest in der akademischen Lehre und Ausbildung zu etablieren, fehl.

Während ALGOL-68 sehr bald von der Bildfläche verschwand, entwickelte Niklaus Wirth ALGOL-W in den Jahren 1966 bis 1970 zu der Programmiersprache Pascal weiter, die ihm als »erste Informatik-Sprache« (Rechenberg 1991: 110) hohe Reputation einbrachte. Wie ALGOL hat freilich auch Pascal nie eine nennenswerte praktische Bedeutung erlangt. Diese Sprache besitzt heute eine primär sozialisatorische Funktion und dient vorwiegend pädagogischen Zwecken in der akademischen Ausbildung. Pascal legt der Programmierung eine hohe Disziplin und formale Strenge auf, in

165 Wirth charakterisiert die Situation im Komitee der IFIP wie folgt: »One party consisted of the ambitious members, unwilling to build upon the framework of ALGOL 60, unafraid of constructing features that were largely untried and whose consequences for implementors remained a matter of speculation, and eager to erect another milestone similar to the one set by ALGOL 60. The opponents were more pragmatic. They were anxious to retain the body of ALGOL 60 and to extend it with well-understood features widening the area of applications for the envisaged successor language, but retaining the orderly structure of its ancestor ... aware that otherwise a milestone might easily turn into a millstone« (Wirth o.J.: 2).

der sich die Studenten der Informatik üben sollen, bevor sie mit einer Sprache wie FORTRAN in Berührung kommen.

6.2.2 Rechnerfamilien und das erneute Scheitern der Komiteestandardisierung

Nach ihrem Rückzug aus dem ALGOL-60 Projekt entschied sich die IBM, FORTRAN künftig auf einem »evolutionären Weg« über mehrere, als »Brücken« dienende Versionen zu einer ALGOL-ähnlichen Sprache weiterzuentwickeln, die FORTRAN ablösen sollte (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 347). Zugleich entdeckte das Unternehmen 1961 mit der sogenannten Mikroprogrammierung jedoch auch eine alternative Möglichkeit zur Lösung des drängenden Kompatibilitätsproblems durch maschinenunabhängige Hochsprachen und entwickelte in einem bis dahin einmaligen finanziellen und organisatorischen Kraftakt in den Jahren 1961 bis 1964 mit dem System 360 eine sogenannte Rechnerfamilie von zunächst sechs Maschinen von unterschiedlicher Größe und Leistungsfähigkeit, die sowohl abwärts wie aufwärts kompatibel waren.¹⁶⁶ Während die IBM mit dem Versuch, eine neue Standardsprache zu schaffen, einen ähnlichen Schiffbruch wie das ALGOL-Komitee der IFIP erlitt, entwickelte sich die Strategie der Rechnerfamilie zu einem großen kommerziellen Erfolg, mit dem das Unternehmen seine Monopolstellung auf dem informationstechnischen Markt ausbauen und bis weit in die siebziger Jahre festigen konnte.

Das System 360 erwies sich als ein geradezu genialer marktstrategischer Kunstgriff. Mit ihm gelang es der IBM um die Mitte der sechziger Jahre, einen proprietären Kompatibilitätsstandard zu etablieren, der zu dem vielleicht größten kommerziellen Erfolg in der Geschichte dieses Unternehmens führte. Das System 360 bot den Kunden von IBM erstmals Wahlmöglichkeiten zwischen den verschiedenen Hardwaresystemen der IBM, ohne daß sie ihre Investitionen in die vorhandenen Softwaresysteme verloren.

Die Programme der älteren IBM-Rechner liefen ebenso auf den neuen Maschinen, und die für kleinere Anlagen des Systems 360 entwickelte Software ließ sich auch auf die größeren Maschinen der Rechnerfamilie portieren. Technisch basierte die Kompatibilität dieser Rechnerfamilie auf sogenannten mikroprogrammierten Prozessoren, die den Befehlssatz anderer

¹⁶⁶ Die immensen Anstrengungen und die großen Erfolge, die mit der Entwicklung des Systems 360 verbunden waren, beschreiben ausführlich Pugh/Johnson/Palmer (1991).

Maschinen emulierten.¹⁶⁷ Die Kunden von IBM konnten damit bei Bedarf auf leistungsfähigere Rechner wechseln, ihre Programme übernehmen und sie sukzessive, dem Leistungsstand der Hardware entsprechend »nach oben« anpassen. Die neue Rechnerfamilie ermöglichte also eine bislang unbekannte Flexibilität bei einer gleichzeitigen Senkung der Kosten für die Softwareentwicklung. In gleicher Weise konnte IBM damit die Ausgaben für die Entwicklung der Grundsoftware entscheidend senken. Für die Maschinen des Systems 360 mußte mit dem Operating System 360 (OS-360) nur noch ein Betriebssystem entwickelt werden, das mit der wachsenden Leistungsfähigkeit der Hardware sukzessive nach oben angepaßt werden konnte. Da die IBM-Rechner aber nur untereinander und nicht mit den Maschinen anderer Hersteller kompatibel waren, blieb jedoch zugleich die Bindung der Anwender an das Unternehmen erhalten.

IBM erschloß sich durch das System 360 einen homogenen internationalen und rasch wachsenden Massenmarkt auf der Basis eines unternehmensinternen Kompatibilitätsstandards und errang mit weltweit über 35.000 Installationen in nur fünf Jahren mehr als siebzig Prozent des Marktanteils.¹⁶⁸ Fast alle Konkurrenten der IBM kopierten die Strategie der Rechnerfamilie, holten deren Vorsprung freilich nicht mehr auf und sahen sich zunehmend außerstande, Kunden von der IBM abzuwerben.¹⁶⁹ IBMs inter-

167 Bei mikroprogrammierten Rechnern werden die Maschinenbefehle durch ein spezielles Programm ausgeführt, das nochmals zwischen dem Maschinencode und dem elektronischen Steuerwerk der Rechner liegt und in einem ROM (Read Only Memory) gespeichert wird. Mikroprogramme werden deshalb auch als »Firmware« bezeichnet. Durch diese zusätzliche Stufe zwischen Steuerwerk und Maschinensprache lassen sich die Rechner trotz unterschiedlicher Hardwarekonfigurationen mit einem gemeinsamen Satz von virtuellen Maschinenbefehlen ausstatten. Ein mikroprogrammierter Rechner A kann damit den Befehlssatz eines Rechners B nachbilden oder emulieren (vgl. Duden Informatik 1993: Stichwort Mikroprogrammierung).

168 Der große kommerzielle Erfolg des Systems 360 hatte dann auch zur Folge, daß sich die IBM seit der Mitte der sechziger Jahre zunehmend aus dem militärischen Computermarkt zurückzog und sich mehr und mehr auf die Entwicklung von zivilen Hardwaresystemen und Softwareprodukten konzentrierte, ohne freilich die Kontakte zu der technologisch nach wie vor führenden militärischen Forschung und Entwicklung vollkommen preiszugeben. »The sheer volume of commercial applications made it far more practical to ›hitch a ride‹ by hardening commercially available technology rather than trying to amortize high development and tooling costs over much smaller DoD procurement quantities« (Flamm 1988: 95).

169 In den USA wurden die Computerhersteller am Ende der sechziger Jahre nur noch als »Schneewittchen und die sieben Zwerge« bezeichnet, da sich Honeywell, Univac, Burroughs, RCA, General Electric, NCR und Control Data als die verbliebenen Konkurrenten von IBM den restlichen Marktanteil von 30 Prozent teilen mußten. Mit dem Aus-

ner Kompatibilitätsstandard sicherte dem Unternehmen eine bis zur Mitte der siebziger Jahre unangefochtene Monopolstellung unter den Computerherstellern.

Während sich das System 360 zu einem durchschlagenden kommerziellen Erfolg entwickelte, scheiterte die IBM jedoch mit dem Versuch, FORTRAN über mehrere kompatible Versionen zu einer ALGOL-ähnlichen Sprache weiterzuentwickeln und mit dieser Sprache einen neuen Standard zu schaffen. Bei diesem Versuch wurde zunächst deutlich, daß es die architektonischen Prinzipien von FORTRAN nicht erlaubten, aus dieser Sprache ein logisch konsistentes und sauber definiertes Werkzeug zu machen. Die Arbeit an einer dritten Version, FORTRAN-III, wurde abgebrochen, bevor der Sprachentwurf fertiggestellt war, und eine vierte Version, FORTRAN-IV, erwies sich als völlig inkompatibel mit dem weit verbreiteten FORTRAN-II. Nach einem weiteren glücklosen Versuch mit FORTRAN-V entschloß sich IBM deshalb, eine völlig neue Programmiersprache zu entwickeln, die zunächst unter der Bezeichnung NPL (New Programming Language), dann unter dem Namen PL/I (Programming Language One) firmierte (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 345–355).

Doch PL/I war ebenfalls kein Glück beschieden. Die Sprache teilte das Schicksal von ALGOL-68 und ging Ende der sechziger Jahre sang- und klanglos unter. Auch PL/I war ein Komiteeprodukt, an dem sich die ACM und Share beteiligten, und geriet wie ALGOL-68 zu einer überkomplexen »Elefantensprache«. Trotz beträchtlicher Anstrengungen und sogar einer formalen Sprachbeschreibung ließ sich die Syntax und Semantik von PL/I nicht unter Kontrolle bringen. PL/I-Programme waren instabil, fehleranfällig und ineffizient. Ursprünglich sollte die Sprache 1963 als Bestandteil von OS-360 zusammen mit dem System 360 ausgeliefert werden. Ihre Auslieferung verzögerte sich aber um rund vier Jahre und ein erster wirklich lauffähiger Compiler war sogar erst 1970 verfügbar (Pugh/Johnson/Palmer 1991: 355). PL/I erregte nur kurze Zeit das Aufsehen von Experten, wurde jedoch wie ALOGL-68 so gut wie nie benutzt und bereits 1969 in dem Standardwerk »Programming Languages« von Jean E. Sammet unter der Rubrik »Languages of Historical Interest Only« aufgeführt (Sammet 1969: 540–582).

Damit blieb es bei FORTRAN als dem faktischen Standard unter den Programmiersprachen. Pugh, Johnson und Palmer vermuten, daß die IBM nur dann eine Chance gehabt hätte, die von ihr selbst gerufenen Geister wie-

scheiden von RCA und General Electric aus diesem Markt sprach man dann von »IBM and the BUNCH« (Brock 1986: 242).

der loszuwerden, wenn PL/I in den ersten kritischen Monaten nach der Einführung des Systems 360 verfügbar gewesen wäre.

There was, at a time, a window of opportunity for PL/I that opened briefly. It closed forever, however, when the early implementations proved that plans to develop the language and its compilers had called for too much too soon.

(Pugh/Johnson/Palmer 1991: 355)

IBM unternahm keinen weiteren Versuch mehr, mit einem neuen Sprachentwurf einen neuen Standard zu setzen. Zugleich verlor das Unternehmen die Kontrolle über seine Programmiersprache FORTRAN (Bemer 1969: 158–159), von der heute zahllose Dialekte und Derivate existieren.

In ähnlicher Weise wie FORTRAN etablierte sich COBOL als der internationale Standard auf dem Gebiet der kaufmännischen Programmierung (Eggeling 1985: 42–80). In diesem Fall handelte es sich um einen Lock-in-Effekt, der durch die Nachfragemacht des amerikanischen Verteidigungsministeriums induziert wurde (vgl. dazu und im Folgenden Eggeling 1985: 40–80).

Ende der fünfziger Jahre existierten auch im Bereich der kaufmännischen Programmierung bereits zahlreiche Sprachen wie AIMACO, COMTRAM, FACT, FLOWMATIC oder SURGE, die nicht anders als FORTRAN oder MATHEMATIC jeweils auf die speziellen Hardwaresysteme der Computerhersteller zugeschnitten waren. Angesichts der Vielzahl unterschiedlicher Entwürfe setzte das Pentagon 1959 auf Initiative der Anwender ein Komitee ein, das damit beauftragt wurde, eine herstellerunabhängige Standardsprache zu definieren.

Dieses Komitee unterteilte sich wiederum in ein »short-range-«, »intermediate-range-« und »long-range-committee«. Die Aufgabe des »short-range-committee« bestand darin, auf der Basis der existierenden Konzepte kurzfristig einen Entwurf zu entwickeln, der für einige Jahre als Interimslösung fungieren, dann von einer im »intermediate-range-committee« weiterentwickelten Sprache abgelöst und vom »long-range-committee« langfristig gewartet werden sollte (ebd.: 66).

Dieses Arrangement scheiterte jedoch an einem Konflikt zwischen dem »short-range-« und dem »intermediate-range-committee«, die sich auf kein gemeinsames Basiskonzept zu einigen vermochten. Während das erste nur über wenige Monate Zeit verfügte, um einen Sprachentwurf vorzulegen und sich mit COBOL nahezu fristgerecht auf eine äußerst pragmatische Lösung einigte, gingen die Meinungen über ein langfristig tragfähiges Konzept im »intermediate-range-committee«, dessen Arbeit auf mehrere Jahre angelegt

war, auseinander. Fest stand dort nur, daß COBOL in der Form, in der der Sprachentwurf durch das »short-range-committee« fixiert worden war, als künftiger Standard nicht in Betracht kam.

Das sich hieraus entwickelnde »famous battle of committees« (Eggeling 1985: 73) entschied dann das amerikanische Verteidigungsministerium, um zu verhindern, daß sich im Verlauf dieses Konflikts ein proprietärer Standard durchsetzte. Im Jahr 1960 erschien »eine einfache Ankündigung, die besagte, daß die Regierung der Vereinigten Staaten keine Rechenanlagen kaufen oder mieten würde, wenn dafür nicht ein COBOL-Compiler vorhanden wäre« (ebd.: 74). Diese Ankündigung stabilisierte fast augenblicklich die Welt der kaufmännischen Programmierung und machte COBOL zum De-facto-Standard in der kommerziellen Programmierung schlechthin. Obwohl vom DoD noch immer als Interimslösung gedacht, starben alle konkurrierenden Sprachentwürfe in diesem Bereich aus, während mit COBOL wie bereits im Fall von FORTRAN einer der konzeptionell fragwürdigsten Entwürfe überlebte.¹⁷⁰

6.3 Symbiose der Softwaretechnik mit der Elektronik und ihr Eigenleben gegenüber der Informatik

Es gehört zwar ins Reich der Spekulationen, doch es gibt gute Gründe für die Annahme, daß die Informatik langfristig durchaus dann eine Führungsrolle gegenüber der programmiertechnischen Praxis hätte einnehmen können, wenn es bei den Zentralrechnern und Rechenzentren der sechziger Jahre und der Softwaretechnik als einer reinen Rechentechnik geblieben wäre, zumal die meisten theoretischen und methodischen Probleme, die zur Prägung des Begriffs von der Softwarekrise führten, »heute zufriedenstellend gelöst werden« (Spillner 1994: 51). Genauso hätte die »erzieherische Komponente« (Zemanek 1991: 65) knapper Speicherkapazitäten eine solche Entwicklung begünstigt. Unter der Bedingung stagnierender Hardwarekapazitäten wären softwaretechnische Fortschritte nur durch strenge formale Methoden und eine strikte Selbstdisziplinierung der Programmierung zu realisieren und die Entwickler der Systeme dazu gezwungen gewesen, sich in der

170 In der ihm eigenen Sprachwahl brachte Dijkstra dies auf den Punkt: »The use of COBOL cripples the mind; its teaching should, therefore, be regarded as a criminal offence« (Dijkstra, zitiert nach Eggeling 1985: 75).

Kunst des Weglassens nicht unbedingt erforderlicher Programmzeilen zu üben. Über eine solche Softwaretechnik der begrenzten Ziele und über befriedigende Sets von konzeptionellen und methodischen Standards hätte sich die Informatik auch ganz im Sinne des Schemas von Whitley zur einer hierarchisch stratifizierten Normalwissenschaft mit deutlich konturierten Reputationszentren und einer kooperativen Koordination und korporativ strukturierten Normierung des Feldes entwickeln können.

Bereits die für die heutigen Verhältnisse winzigen Speicherkapazitäten der damals größten Mainframes hätten es erforderlich werden lassen, den Zugang zu den knappen CPU-Zeiten zu überwachen und hierarchisch zu verwalten. Die Nutzer hätten sich hierarchisch gesetzten Standardverfahren für die optimale Auslastung der Maschinen unterwerfen müssen, und um die Transaktionskosten zwischen den Rechenzentren zu verringern, wären vermutlich Netzwerke von korporativen Akteuren zur Koordination und Normierung der Rechentechnik entstanden. Ansätze, die Nutzung der Anlagen innerhalb und zwischen den Rechenzentren einheitlich zu regeln, waren in den sechziger Jahren durchaus vorhanden (Interview II).

Die Chancen für eine solche hierarchische Koordination der Softwaretechnik schwanden jedoch in dem Maße, wie die Zentralrechner als Folge der »Koevolution« (Ceruzzi 1989), die diese neue Technik mit der Elektronik eingegangen ist, von dezentral verteilten Systemen abgelöst wurden, die zugleich immer größere programmiertechnische Möglichkeiten boten. Mit ihrer Emanzipation von den physikalischen Maschinen und ihrer Spezialisierung auf rein symbolische Systeme lieferte die Softwaretechnik zugleich die Voraussetzung für die Spezialisierung der Elektronik auf die Entwicklung immer kleinerer und schnellerer Prozessoren, die zu ungeahnten Leistungssteigerungen der Hardwaresysteme geführt hat. Die Computer science, so Ceruzzi, verdankte der Elektronik ihre Geburt und revanchierte sich, indem sie ihr mit dem Computer und den digitalen Schaltungen ein klares technisches Leitbild und instruktives Forschungsziel vorgab (ebd.: 271–272).

Der Computer löste einen grundlegenden Identitätswandel der Elektronik aus. Seit der Entdeckung der Halbleiter am Ende des neunzehnten und noch bis weit in die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts wurde ihr Anwendungsgebiet hauptsächlich in der Verstärkung und Modulation kontinuierlicher Signale in der Radio- und Radartechnik gesehen. Soweit sich die elektronische Forschung und Entwicklung mit der Rechentechnik befaßte, ging es um die Simulation von mechanischen Analogrechnern, die ebenfalls durch kontinuierliche Ströme gesteuert wurden. Mit dem Siegeszug des digitalen Computers und der Ausdifferenzierung der Programmierung zu einer eigenstän-

digen Technik hat sich dann das Aufgabenfeld der Elektronik zunehmend in Richtung einer wissenschaftlich-technischen Lehre von den digitalen Schaltungen verschoben. Die Ablösung der Programmierung von den konkreten Maschinen führte zu einer enormen Effizienzsteigerung der Rechentechnik, da sie es zuließ, sehr viel komplexere und flexiblere Anwendungen zu implementieren, als dies durch hardwaretechnische Lösungen und »fest verdrahtete« Systeme möglich gewesen wäre. Die Softwaretechnik ersetzte mit ihren flexiblen Systemen in wachsendem Maße die hardwaretechnischen Lösungen, entlastete damit zugleich die Elektronik von den konkreten Anwendungen der Maschinen und gab ihr jetzt das im Prinzip einzige Ziel vor, auf immer kleinerem Raum immer leistungsfähigere Schaltkreise zur Verfügung zu stellen.

»It is this separation that electrical engineering has seized upon« (Ceruzzi 1989: 273).¹⁷¹ Softwaretechnik und Elektronik sind seit den späten sechziger Jahren im Prinzip nur noch über die Schnittstelle des digitalen Maschinen-codes miteinander verbunden und konnten damit jeweils eigenständige kognitive und soziale Strukturen entwickeln. Als Folge ihrer Entkoppelung von den vielfältigen Anwendungen der Maschinen erschloß sich die Elektronik mit dem homogenen Standardprodukt des digitalen Computers sowohl ein klares und instruktives Forschungsziel als auch einen fest umrissenen Forschungsgegenstand. Dementsprechend wandelte sich ebenfalls ihre soziale Organisationsform von einer »adhocracy« zu einem professionellen Forschungsfeld. »Der unbeschwerte Handwerkerstil, mit dem die neugierigen und unbekümmerten Alleskönner eingestiegen waren, wich einer sich perfektionierenden Organisation« (Queisser 1987: 177).¹⁷² Nachdem die elektronischen Röhren als Schaltelemente seit dem Ende der fünfziger Jahre zunehmend von der Transistortechnik abgelöst worden waren, und diese Technik wiederum in der Mitte der sechziger Jahre an ihre Grenzen geriet, führte die Suche der Elektronik nach schnelleren und kleineren Schaltungen immer tiefer in die Physik der Halbleiter und insbesondere der Siliziumkristalle. Mit der Entdeckung dieser Kristalle für die Schalttechnik wandelte sich die Elektronik von einem eher handwerklich-experimentell ausgerich-

171 Das weit verbreitete Bild von der mikroelektronischen Revolution, in der die Elektronik gewissermaßen als unabhängige Variable und treibende Kraft der Softwaretechnik erscheint, hängt also zumindest schief. Beide Techniken bedingen sich wechselseitig und sind zirkulär aufeinander bezogen.

172 Vgl. zur Entwicklung der Elektronik die ebenso faszinierende wie informative Monographie »Kristallene Krisen« von Hans-Joachim Queisser (1987).

teten Feld zu einem stark grundlagentheoretisch orientierten und kumulativ fortschreitenden Forschungsgebiet, das immer feinere Meßverfahren und theoretische Modellierungen der Kristalle, immer sauberere Werkstoffe und immer höher integrierte Schaltungen hervorbrachte. Die Spezialisierung der Elektronik auf die digitale Schaltungstechnik leitete zugleich das geradezu explosive Wachstum der Speicherkapazitäten der Computer in den vergangenen drei Jahrzehnten ein. Seit dem Ende der sechziger Jahre haben hoch und höchst integrierte Siliziumchips die Verarbeitungskapazitäten der Maschinen durchschnittlich alle zwei Jahre verdoppelt und am Ende der siebziger Jahre aus dem Computer ein immer kleineres, billigeres und leistungsfähigeres Massenprodukt werden lassen.

Heute werden insgesamt fünf Computergenerationen auf der Basis stets höher integrierter Halbleitersysteme und Schaltkreistechniken unterschieden.¹⁷³ Als die erste Computergeneration gelten in diesem Zusammenhang die Rechner der vierziger und fünfziger Jahre, die als Schaltelemente Elektronenröhren benutzen. Nach heutigen Maßstäben arbeiteten diese röhrenbestückten Rechner mit etwa 1.000 Instruktionen pro Sekunde noch ausgesprochen langsam. Bereits seit Mitte der fünfziger Jahre wurden die Röhrencomputer dann mehr und mehr durch die transistorisierten Rechner der zweiten Generation abgelöst, die mit etwa 10.000 Instruktionen pro Sekunde bereits auf das Zehnfache der Leistung ihrer Vorgänger kamen. Diese Maschinen waren im übrigen bereits deutlich kleiner und preiswerter als die röhrenbestückten Computeranlagen.

Diese Entwicklung setzte sich mit dem Einsatz von teilweise integrierten Schaltkreisen seit der Mitte der sechziger Jahre ungebrochen fort. Diese dritte Computergeneration war ebenfalls wieder kleiner, preiswerter und schneller. Die Rechner mit den partiell integrierten Schaltkreisen brachten es auf etwa 500.000 Instruktionen pro Sekunde und leisteten damit wiederum das Fünzigfache ihrer noch vollkommen diskret aufgebauten Vorgänger. Aufgrund der Leistungssteigerungen und der Raumersparnis, die durch die integrierten Schaltkreise möglich wurden, traten nun neben den klassischen Großrechner oder Mainframe bereits die sogenannten Minirechner. Aus heutiger Sicht waren dies jedoch immer noch schrankgroße Ungetüme, die aber bereits eine Dezentralisierung des Rechnereinsatzes ermöglichten.

Mit dem Übergang von den teilweise integrierten Schaltkreisen der dritten zu den hochintegrierten Schaltkreisen der vierten Computergeneration zu

173 Vgl. dazu Brock 1986; zu den fünf Generationen und ihren Leistungsmerkmalen im einzelnen auch den Duden Informatik (1993: Stichwort Informatik, 313).

Beginn der siebziger Jahre ließ sich der Prozessor einer Maschine dann auf einem einzigen Siliziumplättchen, dem sogenannten Chip, unterbringen. Diese hochintegrierten Schaltkreise verarbeiteten jetzt etwa 10 Millionen Instruktionen pro Sekunde und steigerten damit die Rechenkapazitäten der Maschinen im Vergleich zur Vorgängergeneration nochmals um das Zwanzigfache. Die Minicomputer näherten sich mit dieser Entwicklung jetzt an die Leistungsfähigkeit der Großrechner an und wurden nochmals deutlich kleiner. Am Ende der siebziger Jahre erhielten die Minirechner zudem ihrerseits Konkurrenz durch preiswerte Mikrocomputer.

Die fünfte und vorläufig letzte Generation von Computern stellte dann diesen Leistungszuwachs noch in den Schatten. Mit den hier eingesetzten höchstintegrierten Schaltkreisen stieg die Verarbeitungskapazität eines Prozessors auf rund eine Milliarde Instruktionen pro Sekunde und damit um den Faktor Hundert gegenüber der vierten Computergeneration. Die heutigen Rechner verarbeiten also eine Million mal mehr Instruktionen pro Sekunde als die Rechner der ersten Computergeneration. Zugleich sank mit der Einführung der höchst integrierten Schaltkreise der Preis für die Million Instruktionen pro Sekunde, der 1980 noch bei über 250.000 US Dollar lag, bis 1990 auf unter 2.500 US Dollar (vgl. Genschel 1995: 66). Aus den Minicomputern wurden im Zuge dieser Entwicklung leistungsstarke Personal Workstations, während gleichzeitig die Grenzen zwischen diesen Minirechnern und den Mikrocomputern unscharf geworden sind. Zudem ist ein Ende des Wachstums der Rechenkapazitäten nicht in Sicht. Selbst wenn, was sich in der Tat absehen läßt, allmählich die physikalischen Grenzen einer weiteren Integration der Schaltkreise erreicht werden, ermöglichen neue Rechnerarchitekturen mit einer Vielzahl von parallel geschalteten Prozessoren weitere und unter Umständen noch raschere Steigerungen der Rechenkapazitäten. Bereits jetzt verarbeiten Prototypen solcher Parallelrechner sechs bis sieben Milliarden Instruktionen in der Sekunde und es ist völlig offen, in welche Dimensionen künftige Rechnergenerationen noch vordringen werden.

Die mikroelektronische Revolution leitete auch eine Revolution der informationstechnischen Industrie ein, die sich im Verlauf der siebziger Jahre von einem monopolistisch strukturierten Sektor zu einem hoch kompetitiven und turbulenten Markt entwickelte.¹⁷⁴ Als Folge der wachsenden Integration der Schaltelemente verlagerte sich die Entwicklung und Fertigung der Pro-

174 Zu den geradezu revolutionären Veränderungen, die von der mikroelektronischen Revolution in der informationstechnischen Industrie um die Mitte der siebziger Jahre ausgelöst wurden vgl. ausführlich Brock (1986) und Genschel (1995: 65–74).

zessoren von den Anbietern der Computersysteme zunehmend auf die Produzenten der Halbleiter selbst. Zulieferunternehmen wie etwa Intel, die mit ihren Transistoren zunächst nur Einzelteile für die Fertigung von Computern produzierten, boten bereits Anfang der siebziger Jahre fertige Rechnerarchitekturen auf einem Chip an. Die Computeranbieter konnten jetzt in wachsendem Maße vorgefertigte Teile kaufen, statt sie selbst herzustellen. Entsprechend die Fertigung der Rechner in den fünfziger und sechziger Jahren noch dem Muster des Anlagenbaus, so wurde ihre Montage jetzt immer einfacher und näherte sich dem der Massenproduktion an. Während die Halbleiterhersteller einen immer größeren Teil der Wertschöpfung bei der Entwicklung und Produktion der Hardware übernahmen, sank die Fertigungstiefe der computerproduzierenden Unternehmen entsprechend ab.

Damit verringerten sich nun zugleich die Zutrittsbarrieren zum informationstechnischen Markt. Neue Anbieter konnten jetzt vorgefertigte Hardwarekomponenten kaufen, neu kombinieren und mit innovativen Produkten auf den Markt treten. Dies führte seit der zweiten Hälfte der siebziger Jahre zu einer wachsenden Differenzierung des Angebots von Rechnern und einem immer intensiveren Wettbewerb, der das monopolistische Gleichgewicht der sechziger und frühen siebziger Jahre zerstörte und den informationstechnischen Sektor in einen Käufermarkt mit hoher Kundensouveränität verwandelte.

Oberhalb des Leistungsbereichs der Großrechner entstanden – wie etwa mit dem Supercomputer von Cray Research – extrem schnelle Anlagen für wissenschaftliche Anwendungen, während sich unterhalb dieses Bereichs in wachsendem Maße Minirechner von Unternehmen wie DEC, Hewlett-Packard oder Nixdorf etablierten, die an die Kapazitäten der Mainframes nahezu heranreichten und in der räumlichen Nähe zu ihren Anwendern eingesetzt werden konnten. Am Ende der siebziger und zum Beginn der achtziger Jahre erschienen dann die ersten Mikrorechner bzw. Personal Workstations von Firmen wie Sun Microsystems und Personal Computers von Unternehmen wie Apple am Markt, die es erlaubten, den Rechner direkt am individuellen Arbeitsplatz einzusetzen. Die Marktanteile dieser Mini- und Mikrocomputer wuchsen massiv auf Kosten der Mainframes. So sank der Anteil der Großrechner am europäischen Computermarkt, der in der Mitte der siebziger Jahre noch rund achtzig Prozent ausmachte, bis zum Anfang der neunziger Jahre auf knapp zwanzig Prozent, während die Mikrocomputer im gleichen Zeitraum sechzig Prozent dieses Marktes eroberten (Genschel 1995: 70). Mit der Ablösung der klassischen Großrechner durch dezentral verteilte Systeme lief die Ära der Rechenzentren allmählich aus. Die Anwender gingen zunehmend dazu über, Mini- und Mikrocomputer mit unter-

schiedlichen Leistungsmerkmalen und unterschiedlicher Herkunft zu installieren und über private Local Area Networks (LANs) oder öffentliche Telefonnetze miteinander zu verbinden. Damit fand am Beginn der siebziger Jahre die »Hochzeit« der Informationsverarbeitung und der Telekommunikation statt.

In dem Maße, wie die Computer aus den Rechenzentren auf die Arbeits-tische der Anwender migrierten, veränderte sich auch der Charakter der Softwaretechnik. Mit dem Niedergang der Mainframes bildete sich ein eigenständiger und rasch expandierender Softwaremarkt heraus, auf dem die Computerhersteller die Kontrolle über das Softwareangebot verloren. Einheitstechnische Lösungen aus einer Hand, die Erfolgsstrategie der IBM in den sechziger Jahren, ließen sich immer weniger durchsetzen. Lag die Herstellung und Wartung der Programme bis zum Beginn der siebziger Jahre so gut wie ausschließlich bei den Computeranbietern selbst, so traten jetzt verstärkt unabhängige Drittanbieter mit eigenen Softwareprodukten auf (Brock 1986). Zugleich drang die Softwaretechnik mit den geradezu explosionsartig expandierenden programmiertechnischen Möglichkeiten und der rasanten Verbreitung immer kleinerer und leistungsfähigerer Maschinen in kürzester Zeit mit immer komplexeren Systemen in eine ungeahnte Vielfalt heterogener Anwendungsbereiche vor. Aus der Rechentechnik der fünfziger und sechziger Jahre wurde jetzt eine Regelungs-, Steuerungs-, Simulations- und Wissenstechnik, die potentiell alle natürlichen, technischen und sozialen Vorgänge umfaßt, in denen Informationsprozesse eine Rolle spielen. Sie ist heute eine universelle Querschnittstechnik, die aber auch wie keine andere Technik idiosynkratische Lösungen zuläßt (Brooks 1995).

Mit der Softwaretechnik ist ein neuer Typus von Technik entstanden, der nicht den Beschränkungen der klassischen Ingenieurdisziplinen unterliegt. Sie ist eine immaterielle Technik, die praktisch keine Anwendungsgrenzen und keine endogenen Komplexitätsschranken kennt.¹⁷⁵ Während die klassischen Ingenieurwissenschaften durchweg an materielle Gegenstandsbereiche

175 Dolotta et al. (1976: 94) vergleichen die Programmierung mit dem »animated movie«, wo die Objekte »may behave in any way that the animator desires, being limited only by his imagination and the physical limitations of the medium«. In ähnlicher Weise vergleicht Frederick P. Brooks, Leiter der Entwicklung des Betriebssystems OS-360 von IBM, die Arbeit des Programmierers mit der Kunst des Dichtens: »Der Programmierer, wie auch der Dichter, arbeitet kaum im Bereich des stofflich Faßbaren. Aus dem Nichts baut er sich Luftschlösser, ist kreativ aus dem Einsatz seiner Vorstellungskraft heraus... Man gibt über eine Tastatur die richtige Zauberformel ein und ein Bildschirm wird lebendig, Dinge erscheinen, die es vorher nie gegeben hat« (Brooks 1987: 7).

gebunden sind und durch Werkstoffe mit weitgehend festliegenden Eigenschaften beschränkt werden, liegt die einzige physikalische Schranke der Softwaretechnik in den Verarbeitungskapazitäten der Hardwaresysteme (Pflüger 1994).

Sowenig wie diese Technik an physikalische Prinzipien gebunden ist, sowenig hängt ihr Anwendungspotential von der Existenz von mathematischem Erklärungswissen ab, wie man lange Zeit und vor allem in der formalistischen Schule annahm. Zwar besagt die logische Isomorphie zwischen dem Computer und der Turingmaschine, daß für jedes erfolgreich ablaufende Programm im Prinzip ein mathematisches Erklärungsmodell existieren muß (Heidelberger 1993). Dies heißt aber eben im Umkehrschluß nicht, daß man über einen geschlossenen formalen Algorithmus verfügen muß, um ein lauffähiges Programm zu schreiben. »Heuristiken und andere Näherungsverfahren erlauben programmierte, formalisierte Lösungen, wo die theoretische oder die praktische Umsetzbarkeit keine algorithmischen Verfahren anbietet« (Coy 1993: 45). Die programmiertechnische Praxis kommt weithin ohne mathematisches Erklärungswissen aus und basiert im wesentlichen auf funktionalen und erfahrungswissenschaftlichen Modellen. Wie Heidelberger feststellt, zeigt »sich gerade am Beispiel der Informatik sehr schön«, daß das Verfügungswissen der Technik »nicht mit dem Erklärungswissen zusammenfällt« (Heidelberger 1993: 16). Gerade in der Softwaretechnik ist es möglich, »Probleme zu lösen, ohne sie explizit theoretisch verstehen zu müssen« (ebd.: 25).¹⁷⁶

Zudem läßt sich auf dem Computer ein und dieselbe Wirkung auf völlig verschiedenen Wegen herbeiführen und Programme mit vergleichbaren Funktionen können völlig divergente Architekturen aufweisen, »only because they were designed by different people« (Brooks 1995: 360). Darüber hinaus kennt die Softwaretechnik auch keine endogenen Stoppregeln, was den Umfang der »features« und Funktionen der Systeme angeht. In dieser Hinsicht ist sie ebenfalls eine »maß- und haltlose« (Pflüger 1994: 251) Technik, die in hohem Maße »willkürliche Komplexität« (Brooks 1995: 360) zuläßt und nur durch die Verarbeitungskapazitäten der Hardwaresysteme beschränkt wird. »In den meisten Domänen der Technik«, so Wiener, »begren-

176 Hoare vergleicht in diesem Zusammenhang die Programmierung mit dem Tennisspiel. So wenig wie ein Tennisspieler die Flugbahn eines Balles berechnet, bedient sich die Programmierung in der Regel geschlossener mathematischer Algorithmen. Sie geht intuitiv vor und basiert weitgehend auf »Tacit Skills« (Hoare 1989: 366).

zen die Naturgesetze das Wachstum der Ansprüche, die Software aber unterliegt keinen solchen Gesetzen« (Wiener 1994: 61).

Schließlich sind Softwaresysteme als »pure thought-stuff« auch »infinitely malleable« (Brooks 1995: 360). Während die Hardwaresysteme mit wachsenden Ansprüchen an ihre Leistungsfähigkeit ersetzt werden müssen, lassen sich die virtuellen Maschinen der Softwaretechnik in fast beliebiger Weise umbauen, ausbauen und flexibel »nach oben« anpassen. Solchen Veränderungen und Erweiterungen sind gegenüber materiellen Produkten um so weniger Beschränkungen auferlegt, als die »physikfreien« (Bauer 1991: 40) Produkte der Softwaretechnik sich nicht abnutzen und keine natürlich begrenzte Lebensdauer haben.

Im Zuge der immer schneller wachsenden Verarbeitungskapazitäten der Maschinen und als Folge ihrer praktisch unbegrenzten Anwendungsmöglichkeiten hat sich die Softwaretechnik heute zu einer ubiquitären Alltagstechnik entwickelt, die in Flugsicherungssystemen, Automobilen, Waschmaschinen und CD-Spielern zum Einsatz kommt. Sie ist in die industrielle Produktion und Anlagensteuerung vorgedrungen und hat die Kommunikationstechnik revolutioniert. Der Computer ist heute nicht mehr nur Rechner und Werkzeug, sondern hat sich zu einem interaktiven Kommunikationsmedium entwickelt (Coy 1994a, 1994b), das auf dem Weg ist, Marshall McLuhans Vision vom »globalen Dorf« (McLuhan 1975) zu realisieren. Aus den einstigen numerischen Rechnern und zentralen Großrechenanlagen sind heute global vernetzte und wahlweise mobile Multimediamaschinen geworden, die Texte, Daten, Grafik, Ton, Bild und Film integrieren und deren kooperative Nutzung in dezentral verteilten Systemen ermöglichen.

Der weitaus größte Teil der softwaretechnischen Anwendungen entstand und entsteht dabei nicht in der Informatik, sondern in der industriellen Praxis, wo die Systeme durch experimentelles Konstruieren entwickelt werden. So wie etwa die Kommunikationsnetze nicht »top down« in der Wissenschaft konzipiert wurden, sondern »bottom up« entstanden sind, ging der gesamte Bereich der CAD/CAM-Anwendungen bis hin zu den heutigen CID/CIM-Systemen¹⁷⁷ nicht aus der Informatik, sondern aus dem Maschinen- und Anlagenbau hervor (Interview IV). Wie bereits in den fünfziger und sechziger Jahren betritt die programmiertechnische Praxis dabei mit immer vielfältigeren und heterogeneren Anwendungen nach wie vor ständig theoretisch und methodisch ungesichertes Neuland. Auch der Umfang der Systeme

177 Von: Computer aided design/Computer aided manufacturing, Computer integrated design/Computer integrated manufacturing.

ist immer stärker gewachsen. So hat vor allem ihre wachsende Vernetzung und die damit verbundene massive Ausweitung der parallelen Datenverarbeitung die Komplexität der Systeme sprunghaft ansteigen lassen.

Die Komplexität der heutigen Systeme geht zu einem Großteil freilich genauso auf den fehlenden Zwang zur ökonomischen Nutzung der Hardwarekapazitäten zurück. Software ist weithin zu »fatware« (Interview XLIV) geworden. Statt sich in der Kunst des Weglassens üben und den vorhandenen Speicherraum effizient nutzen zu müssen, konnten die Softwarehersteller immer freizügiger mit dieser Ressource umgehen. »Der Chip«, so Zemanek, hat die »elementare erzieherische Komponente« knapper Speicherplätze außer Kraft gesetzt und die Programmierung dem Zwang zur Selbstdisziplinierung enthoben, da es »auf raffinierte Kleinsparungen« längst nicht mehr ankommt (Zemanek 1991: 65). Für die Herstellung effizienter und korrekter Programme hat die Softwareindustrie zudem gar keine Zeit. Der rasant expandierende und kurzlebige Markt zwingt sie vielmehr dazu, ihre Produkte »quick and dirty« zu entwickeln und sie mit immer neuen Features und Funktionen auszustatten. Während sich die Softwarehersteller im Funktionsumfang ihrer Programme ständig überboten haben, wurden die Pflichtenhefte der Auftraggeber quasi zu »Wunschzetteln« (Wiener 1994: 161).

Softwaresysteme werden in aller Regel auch nicht »verschrottet« und von Grund auf neu entwickelt, wie dies die Lehre vom Softwarezyklus fordert. Die Systeme »wachsen« vielmehr, und ihre »willkürliche Komplexität« steigt im Zuge ihrer Wartung typischerweise an. Die praktisch unbegrenzte Lebensdauer von Software schafft einen hohen Anreiz, die in eine einmal installierte Softwarebasis eingeflossenen »sunk costs« nicht zu entwerten und die Programme durch inkrementelle An- und Umbauten weiterzuentwickeln. Dieser Anreiz ist um so höher, als die Herstellung eines großen Programms rasch viele tausend Mann-Jahre erforderlich macht, es aber nur geringe Kosten verursacht, ein Softwaresystem zu modifizieren und zu erweitern.¹⁷⁸

178 Aus diesem Grund ist es auch bei den Rechnerfamilien geblieben, wie sie die IBM mit dem Systeme 360 Mitte der sechziger Jahre erstmals eingeführt und damit den Trend zu CISC-Architekturen (Complex Instruction Set Computer) ausgelöst hat. Praktisch alle marktgängigen Rechner verfügen heute über mikroprogrammierte Prozessoren mit abwärtskompatiblen Befehlssätzen, deren Komplexität mit jedem neuen Prozessortyp wächst und die eine gravierende Fehlerquelle der Programmierung bilden, da die »Kombination komplexer Rechnerarchitekturen und leistungsfähiger höherer Programmiersprachen ... zu ineffizienten und unzuverlässigeren Ergebnissen« führt (Furger 1993: 94). RISC-Architekturen (Reduced Instruction Set Computer), die zu wesentlich

6.4 Rückschläge der Informatik, Schiffbruch von Ada und die verschlungenen Pfade von C zur weltweiten Norm

Während sich die Elektronik über den Computer kognitiv und sozial stabilisiert hat, entwickelte sich diese Maschine mit den immer größeren programmiertechnischen Möglichkeiten für die Informatik zu einem sich immer schneller bewegenden »moving target«, das sich theoretisch und methodisch nie fixieren ließ. Die Softwaretechnik ist trotz aller Erkenntnisfortschritte auf dem Gebiet der Algorithmen, bei der formalen Modellierung der Übersetzer, den Verifikations- und Spezifikationsverfahren und in der Parallelverarbeitung dem wissenschaftlichen Wissen über das korrekte Design und das Verhalten großer Programme in einem immer schnelleren Tempo vorangelaufen.¹⁷⁹

Da in der Softwaretechnik ständig neue Aufgaben angegangen werden, »deren wissenschaftliche Beherrschung unsere jeweiligen Erkenntnisse übersteigt« (Goos 1994: 12), ist die Kluft zwischen der Theorie und Praxis der Programmierung heute »hoffnungslos tief« (Heidelberger 1993: 23). Die ständig gestiegene Komplexität der Programme hat den Nutzen zahlreicher theoretischer und methodischer Ansätze entwertet und viele Forschungsziele, die in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren noch in greifbarer Nähe schienen, in weite Ferne gerückt. Größenordnungen von einigen tausend Programmzeilen, die am Ende der sechziger Jahre noch Probleme aufwarfen, sind heute zufriedenstellend beherrschbar, werden aber in der Praxis seit langem bei weitem überschritten.¹⁸⁰

effizienteren Ergebnissen führen, lassen sich aber nicht in großer Stückzahl am Markt absetzen. IBM entwickelte bereits Mitte der siebziger Jahre RISC-Maschinen, entschied aber, diese Maschinen nicht zu produzieren, da sie die existierenden Programme entwertet hätten (Khazam/Mowery 1994: 90). Niklaus Wirth erlitt mit seinem RISC-Computer »Lilith« am Beginn der achtziger Jahre denn auch wirtschaftlichen Schiffbruch. Lilith konnte sich am Markt gegen die abwärtskompatiblen Workstations nicht durchsetzen (Furger 1993).

179 So auch Heidelberger: »Je stärker die Informatik durch die Programmierung mit kontingenten, außerwissenschaftlichen Vorgaben und sozialen Zielsetzungen in Wechselwirkung steht, in desto weitere Ferne rückt das ursprüngliche Ziel, Informationsverarbeitung durch (künstliche oder natürliche) Systeme zu erklären und zu verstehen« (Heidelberger 1993: 24).

180 Der Computer ist nach dem internationalen Telefonnetz, das heute über knapp eine Milliarde Anschlüsse verfügt, bereits das komplexeste physikalische Artefakt, das die technische Entwicklung je hervorgebracht hat (Bonsiepen/Coy 1992: 323), und Softwaresysteme modellieren Zustandsräume, die weit über der Komplexität der Hardwaresysteme liegen. Oder in den Worten von Dijkstra: »When dealing with ›mastered complexity‹,

Dies hat zur Folge, daß das einstmals »ultimative Ziel« (Wirth o.J.: 12) der Informatik, die Programmverifikation, mittlerweile weitgehend aufgegeben wurde, da die wachsende Größe der Systeme zu einem »unüberwindlichen Hindernis für praktikable Verfahren« (Seegmüller 1991: 317) wurde. »Der Korrektheitsbeweis eines größeren Programms ist im allgemeinen so unüberschaubar, daß die Richtigkeit des Beweises selbst schon schwer nachprüfbar ist« (Duden Informatik 1993: 763). Jedes Betriebssystem und jedes größere Applikationsprogramm überfordert die heute verfügbaren Verifikationstechniken bei weitem. Ihr Einsatz lohnt sich deshalb nur im Fall sehr kleiner und kritischer Systeme in Bereichen, die hohe Sicherheitsanforderungen stellen. Doch selbst im Fall relativ kleiner Anwendungen liefern, wie der Fall »Viper« gezeigt hat, die heute bekannten Verifikationsverfahren noch keine Garantie für die Fehlerfreiheit der Programme. »Viper« war ein nach heutigen Maßstäben vergleichsweise einfacher militärischer Prozessor, bei dem schwerwiegende Fehlfunktionen auftraten, obwohl erhebliche Investitionen in die Verifikation seines formalen Designs geflossen waren (Wiener 1994: 125). Die Entdeckung dieser »bugs« hat das Vertrauen in die Verifikationstechnik stark erschüttert.

Zugleich sind die verbleibenden Verfechter dieser Technik sozusagen in die Grundlagenforschung zurückgeworfen worden. Angesichts der unüberwindlichen Schwierigkeiten, größere Programme mit Hilfe der bekannten Verfahren zu verifizieren, sind im Rahmen der »Theorie der Programmtransformation« (Broy 1991) seit dem Beginn der achtziger Jahre neue Konzepte entstanden, die dieses Ziel durch spezielle Spezifikationssprachen zu erreichen suchen. Die Entwicklung solcher Sprachen steht allerdings noch am Anfang, und es ist durchaus ungewiß, ob sie zum erwünschten Ziel führen (Seegmüller 1991: 317–318). »Trotz einiger ansehnlicher Erfolge ist dieser Teil der Konstruktionslehre aber noch keineswegs praxisreif« (Goos 1994: 13). Angesichts des erheblichen mathematischen Aufwands, den die

the idea of a hierarchy seems to be a key concept. The notion of a hierarchy implies that what at one level is regarded as an unanalyzed unit, is regarded as a composite object of greater detail, for which the appropriate grain (say, of time or space) is an order of magnitude smaller than the corresponding grain appropriate at the next higher level. As a result, the number of levels that can meaningfully be distinguished is approximately proportional to the logarithm of the ratio between the largest and the smallest grain. In programming, where the total computation may take an hour, while the smallest time grain is in the order of a microsecond, we have an environment in which the ratio can easily exceed 109 and I know of no other environment in which a single technology has to encompass a so wide span« (Dijkstra, zitiert nach Dolotta et al. 1976: 95).

Spezifikationstechniken erforderlich machen, ist es fraglich, ob sie jemals praktikabel sein werden. Das anspruchsvolle Ziel der Programmverifikation ist heute einer eher pragmatischen Sichtweise gewichen, die dem Testen von Programmen, das seit Dijkstras berühmtem Aufsatz (Dijkstra 1972) als unwissenschaftliche Methode galt, den Vorzug gibt.¹⁸¹

Auch das theoretische Verständnis des korrekten Designs paralleler Prozesse hat mit der faktischen Entwicklung der Softwaretechnik und wachsenden Vernetzung der Systeme nicht Schritt gehalten. Auf dem Gebiet der parallelen Datenverarbeitung sind ebenfalls »Fortschritte erkennbar«, die aber »noch weit hinter den Anforderungen zurückbleiben, die mit dem Stand der Hardware-Entwicklung erreichbar« sind (Coy 1992a: 23). So stoßen etwa die Petri-Netze als spezielle Beschreibungssprache für nebenläufige Prozesse sehr rasch an Komplexitätsgrenzen und sind insbesondere für die Modellierung dynamischer Systeme, bei denen wie in jedem interaktiven Netz laufend neue Prozesse erzeugt werden, ungeeignet (Duden Informatik 1993: 520–524). Ebenso hat die Forschung über nichtmonotone Logik, was das Design paralleler Prozesse angeht, bislang keine befriedigenden Ergebnisse hervorgebracht.

Die Formalisierung nichtmonotoner Logik ist ein noch unzureichend verstandenes Problem. Bislang entwickelte Kalküle sind nicht entscheidbar und geben kaum Hinweise auf praktische Implementierungen. (Coy/Bonsiepen 1989: 58)

Es ist durchaus umstritten, ob es mit den Mitteln der gegenwärtigen mathematischen Theoriebildung überhaupt möglich ist, komplexe Programme auf formale Strukturen zurückzuführen, oder hierfür nicht vielmehr eine ganz neue Mathematik oder Metamathematik erforderlich ist. »The search for a mathematical structure of computing«, so Michael S. Mahoney, »may well involve a new historical and philosophical structure of mathematization« (Mahoney 1992: 363).

Alles in allem fehlt es zur Bewältigung der Komplexität heutiger Softwaresysteme weithin an generalisierbaren formalen Prinzipien, übergreifenden theoretischen Modellen und sogenannten »tiefen Algorithmen« (Knuth 1973), die für eine Vielzahl von unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt

181 Selbst Verfechter der formalistischen Schule sehen in der Entwicklung von Testverfahren und Meßmethoden zur Validierung von Programmen heute mehr und mehr eine praktikable Alternative zur formalen Verifikation. So spricht sich auch Goos heute dafür aus: »Testen als Hilfsmittel ... muß seinen angemessenen Platz nicht nur in der Praxis, sondern auch in der Wissenschaft finden. Der Informatik-Wissenschaftler darf nicht länger in Verruf geraten, wenn er sich mit Testverfahren beschäftigt« (Goos 1994: 18).

werden können. Dementsprechend ist der Grad der Wiederverwendbarkeit von Programmteilen und der Standardisierbarkeit von Lösungen nur sehr gering. Als Folge dieses Mangels an übergreifenden theoretischen und methodischen Prinzipien ist die Informatik heute weiter denn je von einem konsistenten Lehrgebäude entfernt. So konstatiert etwa Goos, daß man auch ein Vierteljahrhundert, nachdem der Begriff des Softwareengineering geprägt wurde, »immer noch nicht sehen kann, wie eine solche Konstruktionslehre für Software im einzelnen aussieht« (Goos 1994: 19). Nach wie vor besteht in der Informatik weder Konsens darüber, welche Entwicklungsmethoden, noch welche Algorithmen und Datenstrukturen für bestimmte Kernaufgaben der Programmierung am zweckmäßigsten sind. Die Informatik, so Goos, trägt zur Entwicklung der Softwaretechnik »Einsichten bei«, aus diesen Einsichten ergibt sich aber »kein zusammenpassendes Ganzes« (ebd.: 12). Der Wissenskörper der Informatik entspricht weniger einem kumulativ wachsenden Bestand von Theorien und Methoden als einem additiven Nebeneinander von konzeptionellen Ansätzen und unverbundenen Einzellösungen. »Einzeltheorien und Einzelansschauungen bestimmen das Gebiet« (Mahr 1989: 63).

Auch das Gebiet der Programmiersprachen hat sich weniger kumulativ als in die Breite entwickelt. Hier tut sich nach wie vor eine »ungeheure Spanne« (Pflüger 1994: 251) von theoretischen und methodischen Möglichkeiten auf, und der mit ALGOL am Beginn der sechziger Jahre einsetzende Wildwuchs der Programmiersprachen ist ungebrochen. Ihr Bestand wird heute auf »viele hunderte, ja tausende« geschätzt (Rechenberg 1991: 111). Niemand weiß das so genau.¹⁸² Neben die Unzahl von problemorientierten Sprachen sind auch konzeptionelle Alternativen zur traditionellen algorithmischen Programmierung getreten. Hierbei handelt es sich im wesentlichen um die objektorientierte, funktionale und logische Programmierung mit ihren jeweils applikativen, prädikativen und deklarativen Sprachen, von denen wiederum ungezählte Dialekte und Derivate existieren. Die zum Teil hochgesteckten Erwartungen, die mit diesen nichtalgorithmischen Denkmodellen zeitweise verbunden waren, sind allerdings enttäuscht worden. Ursprünglich als Königswege der Programmierung betrachtet, haben sie sich für jeweils

182 Wie Parnas ironisch bemerkt, habe sich seine Prognose, daß tausendsiebenhundert informatische Dissertationen zu tausendsiebenhundert neuen Sprachen führen, so nicht erfüllt. Es wäre präziser gewesen, im Schnitt nur siebenhundert Sprachen, dafür aber fünfhundert Theorien über Sprachsemantik und nochmals fünfhundert Compiler-Compiler zu prognostizieren (Parnas 1990: 19).

begrenzte Anwendungsgebiete und spezielle Problemlösungen als geeignet erwiesen (Rechenberg 1991: 140–149).

Das Gebiet der Programmiersprachen steht durchaus exemplarisch für die Entwicklung der Informatik. Auf diesem Gebiet werden ständig neue Ansätze und Konzepte entwickelt und neue Kombinationsmöglichkeiten entdeckt, während basale Innovationen und Durchbrüche, um die sich die informatische Forschung kognitiv und sozial zentrieren könnte, ausbleiben. So richteten sich Anfang der achtziger Jahre große Hoffnungen darauf, mit Hilfe der objektorientierten Programmierung das Problem der geringen Wiederverwendbarkeit von Programmteilen grundlegend lösen zu können. Dieser Ansatz ging ursprünglich aus der Simulationstechnik und der hierfür entwickelten Sprache SIMULA hervor, die später den Kern von SMALLTALK als der ersten objektorientierten Sprache bildete. In den siebziger Jahren entdeckte man dann, daß das zunächst für Simulationen gedachte Konzept der Objekte, die wiederum bestimmte Eigenschaften an andere Objekte »vererben« können, den Vorteil besitzt, sogenannte Klassenbibliotheken anlegen zu können und bestimmte Prozeduren nicht immer wieder neu programmieren zu müssen. Aus dieser Entdeckung glaubte man dann zeitweise ein grundlegend neues Denkmodell ableiten zu können, mit dem sich die algorithmische Programmierung und ihre Defizite überwinden und das Problem der Wiederverwendbarkeit von Programmteilen lösen ließe. Tatsächlich weist die objektorientierte Programmierung bestimmte Vorteile gegenüber dem algorithmischen Denkmodell auf und ist im Verlauf der achtziger Jahre auch weit in die softwaretechnische und industrielle Praxis vorgedrungen. Eine Wunderwaffe im Kampf gegen die »Tyrannei der Komplexität« (Rechenberg 1991: 165) ist sie indes nicht. Das objektorientierte Denkmodell mindert das Problem der geringen Wiederverwendbarkeit von Programmteilen, löst es dennoch nicht grundlegend und hat auch die algorithmische Programmierung nicht grundsätzlich abgelöst. SMALLTALK als eine Sprache, die die »reine Lehre« der objektorientierten Programmierung verkörpert, wird in der Praxis kaum benutzt; dort bedient man sich vorzugsweise solcher Sprachen, die beide Ansätze miteinander kombinieren.

Der Nutzen der funktionalen und logischen Programmierung ist in der Tat nur begrenzt. Während sich das algorithmische und objektorientierte Denkmodell für relativ breite Anwendungsgebiete eignete, lassen sich die funktionale und logische Programmierung »nur auf bestimmte Problemklassen sinnvoll anwenden« (Rechenberg 1991: 148). Beide Ansätze gingen mit LISP (List Processing Language) bzw. PROLOG (Programming in Logic) aus der KI-Forschung hervor und wurden von ihren Verfechtern lange Zeit

als universelle und revolutionäre Werkzeuge gepriesen. Mit ihnen sollte es der Programmierung möglich werden, nur noch das Problem formulieren zu müssen und es dem Programm zu überlassen, den Lösungsalgorithmus automatisch zu erzeugen. Indes zeigte es sich, daß beide Modelle »nur ›im Prinzip‹ universell« (ebd.: 148) sind und es der Programmierung keineswegs erlauben, sich auf die Spezifikation der zu lösenden Probleme zu beschränken. Wie sich derzeit abzeichnet, könnten sie sich aber als »möglicherweise fruchtbar für die Zukunft erweisen«, weil sie sich »in mancher Hinsicht besonders gut für die Formulierung von Parallelität« eignen (ebd.: 149). Ob sich künftige parallele funktionale und parallele logische Programmiersprachen den seit kurzem verfügbaren parallelen imperativen Sprachen wie OCCAM als überlegen erweisen werden, ist jedoch eine offene Frage. Die formalen Sprachen sind ein nach wie vor aktuelles Forschungsgebiet der Informatik, auf dem sich auch weiterhin keine Konvergenz der theoretischen Ansätze und Methoden abzeichnet und sich eine wachsende Vielfalt von Konzepten gegenübersteht, deren jeweilige Vorzüge und Nachteile umstritten sind.¹⁸³ »Die Methode oder Sprache zur Lösung aller Probleme wird es wohl auch in Zukunft nicht geben« (Spillner 1994: 51; Hervorh. im Original).

So scheiterte in den siebziger und achtziger Jahren auch der dritte Versuch, eine internationale Standardsprache zu schaffen. Nachdem bereits die IFIP und IBM mit ihren Standardisierungsprojekten Schiffbruch erlitten hatten, wiederholte sich das vom Schicksal der Programmiersprachen ALGOL und PL/I vorgezeichnete Muster auch bei dem erneuten Versuch des amerikanischen Verteidigungsministeriums, eine solche Norm zu definieren. Als Reaktion auf die Softwarekrise und den unglücklichen Ausgang von militärischen Großprojekten wie MAC (Multiple Access Computer) begann das DoD am Beginn der siebziger Jahre mit der Entwicklung einer zunächst als HOL (High Order Language) und später als Ada¹⁸⁴ bezeichneten strukturierten Programmiersprache, die sich durch Einfachheit, leichte Wartbarkeit und hohe Zuverlässigkeit auszeichnen sollte (Kock/Goos 1990: 5). Ada sollte die Vielzahl der in der NATO verwandten Sprachen als Standard des westlichen Bündnisses ablösen und vom Mainframe bis hin zu den Bord-

183 Die Programmiersprachen und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile sind, so Rechenberg, ein »unerschöpfliches Gesprächsthema zwischen Informatikern« (Rechenberg 1991: 112). In der Informatik spricht man in diesem Zusammenhang denn auch davon, daß die Programmiersprachen jeweils spezielle »Denkschemata« oder bestimmte »Programmierstile« repräsentieren (Duden Informatik 1993: 544).

184 Benannt nach Augusta Ada Lovelace, der Assistentin von Charles Babbage.

rechnern von Marschflugkörpern und Flugabwehrraketen einsetzbar sein. Außerdem ging das DoD davon aus, daß sich eine einheitliche militärische Norm ebenfalls in der wissenschaftlichen und kommerziellen Programmierung als Standard durchsetzen werde (vgl. Iburg 1991).

Die Entwicklung von Ada war das bisher größte Einzelprojekt in der Geschichte der Softwaretechnik. Als der weltweit größte Nutzer von Software bezog das Pentagon zudem die Rüstungsindustrie, die akademische Forschung und die nationalen und internationalen Standardisierungsorganisationen in der Softwaretechnik von Beginn an systematisch in das Projekt ein (ebd.: 209–216). Angesichts des finanziellen Aufwands, der sich mit der Entwicklung von Ada verband, und der Vielzahl der Akteure, die sich an dem Projekt beteiligten, zweifelte noch am Beginn der achtziger Jahren kaum jemand ernsthaft daran, daß sie die künftige internationale Norm unter den Programmiersprachen bilden werde. Doch trotz seiner immensen Nachfrage macht es dem DoD nicht gelungen, Ada in der kommerziellen und wissenschaftlichen Programmierung als Standard durchzusetzen, und nicht einmal innerhalb der NATO fungiert die Sprache als einheitlicher Standard.

Ada teilte das Schicksal von ALGOL und PL/I und geriet als eine überkomplexe und fehleranfällige »Dinosauriersprache« (ebd.: 219) zu einem typischen Komiteeprodukt. Ihre Entwicklung nahm rund zehn Jahre in Anspruch und wurde von heftigen Auseinandersetzungen um die Sprachdefinition begleitet. Als Ada dann am Beginn der achtziger Jahre erschien, wurde die Sprache sowohl in der Praxis als auch in der Wissenschaft mit zum Teil vernichtender Kritik bedacht. So kam eine Untersuchung von rund zweitausend Testprogrammen für Ada zu dem Ergebnis:

Early compilers for the new Ada language have been so slow, unwildly to use, and bug-ridden that they have been worthless for real software development. ... The main contributing factors were the many features especially the many new features, incorporated into Ada.

(Office of Technology Assessment, zitiert nach Iburg 1991: 216)

Hoare ging sogar soweit, den Berufsstand der Informatiker und Programmierer dazu aufzufordern, diese Sprache zumindest in sicherheitsrelevanten Bereichen niemals einzusetzen. So äußerte er anlässlich der Verleihung des Turingpreises im Jahr 1980:

Keiner der bisherigen Belege kann uns das Vertrauen geben, daß diese Sprache eines der Probleme vermeidet, die die anderen komplexen Sprachprojekte früher beeinträchtigt haben. ... Im Sinne eines letzten Auswegs appelliere ich an Sie als Vertreter des Berufsstandes der Programmierer in den USA und als Bürger,

denen es um das Wohlergehen und die Sicherheit des Landes geht: Lassen Sie es nicht zu, daß diese Sprache in ihrem gegenwärtigen Zustand in Anwendungsfällen benutzt wird, wo die Zuverlässigkeit entscheidend ist. (Hoare 1984: 72)

Mittlerweile ist es um Ada still geworden. In der wissenschaftlichen und kommerziellen Programmierung hat sich dieser Sprachentwurf nicht durchgesetzt, und selbst Teile der amerikanischen Rüstungsindustrie weigern sich, Ada als Programmierwerkzeug zu verwenden (Iburg 1991: 218). Als Standardsprache der NATO kommt Ada gleichfalls wohl nicht in Frage. Die militärische Softwaretechnik bietet ein nach wie vor uneinheitliches und heute sogar uneinheitlicheres Bild als der zivile Sektor. Innerhalb der NATO konkurriert Ada derzeit sowohl mit anderen nationalen Sprachentwürfen als auch mit der Programmiersprache C (Interview XXIX), die sich im Verlauf der achtziger Jahre und parallel zu dem Versuch des DoD, Ada als Norm zu etablieren, zum faktischen Standard für die Mini- und Mikrorechner entwickelte. Wie bereits die IBM im Fall von FORTRAN wurde damit auch das DoD die Geister, die es einmal gerufen hatte, nicht mehr los. Die Programmiersprache C war eine eigene Entwicklung des amerikanischen Verteidigungsministeriums, die durch Ada abgelöst werden sollte, aber durch einen »historical event« (Arthur 1985) zur internationalen Norm unter den Programmiersprachen schlechthin avancierte.

Diese Sprache ging aus dem gescheiterten Großprojekt MAC des amerikanischen Verteidigungsministeriums hervor, dessen Beginn auf das Jahr 1962 datierte und an dem sich neben dem MIT auch die Bell Laboratories, das Forschungszentrum der amerikanischen Telefongesellschaft AT&T (American Telephone & Telegraph) beteiligte. Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines herstellerunabhängigen Timesharing-Betriebssystems mit der Bezeichnung MULTICS, das als einheitliche Grundsoftware für die telefonvermittelte Vernetzung von Computersystemen unterschiedlicher Anbieter über das ebenfalls in diesem Projekt entwickelte ARPANET dienen sollte (Flamm 1988: 113–116).¹⁸⁵ Für den Bau dieses Betriebssystems verwandte man am MIT und in den Bell Labs die Programmiersprache BCPL, ein frühes Derivat von ALGOL, das der Brite Christopher Stracey entwickelt hatte. Mit der ursprünglichen Philosophie von ALGOL hatte BCPL allerdings nicht mehr viel gemein (Interview I). Die Sprache war von Stracey dazu ausgelegt worden, hohe Maschinennähe mit einem geringen Portie-

185 AT&T sollte Multics als Standardbetriebssystem für die Datenfernverarbeitung und Computerkommunikation später kommerziell vertreiben.

rungsaufwand zu verbinden und benutzte in starkem Maße Assembler-ähnliche Konstrukte, die den direkten Zugriff auf die Hardware erlaubten (vgl. auch Duden Informatik 1993: Stichwort C, 117–121).

Der Zeitaufwand und Personalbedarf für die Entwicklung von Multics überschritt allerdings bei weitem die Planungsansätze, da die Komplexität des Systems seinen Entwicklern über den Kopf wuchs.¹⁸⁶ Ein erster Prototyp von Multics stand erst 1969 zur Verfügung und erwies sich als sehr instabil. AT&T zog sich daraufhin im selben Jahr aus dem Projekt zurück, während zwei Mitarbeiter der Bell Labs, Ken Thompson und Dennis Ritchie, in privater Initiative mit dem Betriebssystem UNIX eine stark verkleinerte Variante von Multics und kurze Zeit später mit C ebenfalls eine modifizierte Version von BCPL für das neue Minicomputersystem PDP-11 der Firma DEC entwickelten (Coy 1994b: 23). AT&T wiederum stellte die beiden Systeme den Hochschulen und Forschungseinrichtungen in den USA gegen eine geringe Lizenzgebühr und quasi als »Public-domain-Produkte« zu Verfügung.¹⁸⁷

Mit dem Vordringen der Hardwaresysteme von DEC entwickelten sich UNIX und C an den amerikanischen Hochschulen im Verlauf der siebziger Jahre zu der am weitesten verbreiteten Grundsoftware für die neuen Mini-computer. Aufgrund seiner leichten Portierbarkeit wurde das Betriebssystem auch auf zahlreichen anderen Minirechnern installiert, während gleichzeitig eine Fülle von C-Programmen entstand, die zum größten Teil als lizenzfreie »freeware« oder »shareware« zirkulierten. Damit standen UNIX und C als herstellerunabhängige, leicht portierbare Systeme und quasi öffentliche Güter zusammen mit bereits zahllosen in C verfaßten Applikationsprogrammen zur Verfügung, als am Beginn der achtziger Jahre die Arbeitsplatzrechner ihren Siegeszug antraten.

Diese installierte Basis von C-Programmen machte sich dann die 1982 gegründete Firma Sun Microsystems zunutze, um mit ihren Workstations gegen den damaligen Marktführer in diesem Segment, Apollo, anzutreten

186 Aufgrund der maschinennahen Programmierung von zudem hoch komplexen nebenläufigen Prozessen stieg die Anzahl der Instruktionen für dieses Betriebssystem auf über zehn Millionen Befehle an (vgl. Flamm 1987: 57).

187 Honeywell Bull übernahm Multics kurze Zeit später und entwickelte am Anfang der siebziger Jahre neue und stabilere Versionen dieses Betriebssystems, die auch kommerziell angeboten wurden. Die mit Multics ausgestatteten Computer von Honeywell konnten jedoch gegen die seit langer Zeit eingeführten und verbreiteten Systeme 360 bzw. 370 von IBM unter OS-360 bzw. OS-370 nicht bestehen. Honeywell mußte den kommerziellen Markt am Ende der siebziger Jahre aufgeben und zog sich mit seinen Produkten ausschließlich auf den militärischen Bereich zurück (Flamm 1987: 113–116).

(Furger 1993). Wie Apollo bot auch Sun eine Maschine auf der Basis des Motorola 68000 an, lieferte seine Rechner hingegen mit UNIX und C aus, während Apollo ein proprietäres Betriebssystem anbot. Sun Microsystems war mit dieser Strategie überaus erfolgreich. Die neue Firma löste Apollo innerhalb von wenigen Jahren als Marktführer ab und ist heute der weltweit größte Anbieter im Bereich der Personal Workstations. Da andere Hersteller dem Beispiel von Sun folgten und ihre Systeme ebenfalls mit UNIX und C auslieferten, gerieten diese ursprünglich militärischen Produkte in einen »virtuous circle« (Hohn/Schneider 1990: 115), durch den sie mittlerweile auch in den Bereich der Großrechner vorgedrungen sind.

Alles in allem haben damit mehr als dreißig Jahre intensiver Forschung über Programmiersprachen so gut wie keine Spuren in der Praxis der Programmierung hinterlassen. Faktisch setzte sich mit C ein Standard durch, der noch hinter ALGOL zurückfiel und wieder »weg von der Strukturierung, weg von der Typisierung« (Interview XLIV) und informatischen Konzepten der Programmierung führte. Mit ihrer maschinenorientierten Auslegung ist C weit von einer sauber definierten, strukturierten Hochsprache entfernt und eine Art leicht portierbarer Ersatz für die Assemblersprachen.¹⁸⁸ Nichtsdestoweniger hat sich C aber auch zum Standard der objektorientierten Programmierung entwickelt. Mit dem Aufkommen dieses Programmierstils in der kommerziellen Softwareproduktion wurde die Sprache in der Version C++ um schlicht objektorientierte Operationen erweitert. C++ der Firma Microsoft ist heute der unangefochtene Standard in der objektorientierten Programmierung. Der Siegeszug von C zwang in den achtziger Jahren auch Softwarehäuser wie Borland, die sich zunächst der Programmiersprache Pascal bedienten, dazu, sich dem neuen Industriestandard anzupassen. Pascal führt heute in der kommerziellen Programmierung ein Schattendasein. Dies gilt ebenso für Modula 2, mit der Niklaus Wirth am Anfang der achtziger Jahre sozusagen eine objektorientierte Schwester von Pascal entwickelte. Modula 2 hat unter Informatikern ein ähnlich großes Aufsehen erregt wie Pascal, spielt in der softwaretechnischen Praxis gleichwohl eine noch geringere Rolle, als Wirths erstes Produkt (Furger 1993).¹⁸⁹

188 Aufgrund der Maschinennähe von C sind viele Operationen syntaktisch und semantisch nicht definiert und lassen sich nicht auf formale Korrektheit überprüfen. In C erstellte Programme erzeugen deshalb oft »erstaunliche, scheinbar unerklärliche Effekte bis hin zum Rechnerabsturz« (Ammon/Fröhlich/Grainer 1987: 5).

189 Wirth hat sich aus der Forschung über Programmiersprachen zurückgezogen. In seinen Augen lohnt sich ein weiteres Engagement auf diesem Gebiet angesichts der geringen Akzeptanz wissenschaftlicher Programmiermethoden in der softwaretechnischen Praxis

Neben C werden in der programmiertechnischen Praxis auch weiterhin FORTRAN und COBOL auf breiter Basis eingesetzt. COBOL dürfte sogar die am weitesten verbreitete Sprache sein.

Man geht weltweit von rund 77 Milliarden Code-Zeilen (1985) der eingesetzten COBOL-Programme aus. Rund 80 Prozent aller existierenden kommerziellen Programme sind in COBOL geschrieben. Man schätzt das gesamte COBOL-Investment der USA auf 2,3 Billionen Dollar. Allein die Wartung soll jährlich 30 Milliarden Dollar verschlingen.

(Lüthe 1988, zitiert nach Coy/Bonsiepen 1987: 11)

COBOL wird deshalb auf absehbare Zeit der wichtigste Standard in der DV-Welt bleiben und »noch viele Metamorphosen durchleben« (ebd.: 11).

6.5 Von der Abstraktion in die Komplexität des Einzelfalls – Entwicklungstendenzen der Programmierung

Scheitert die Normierung der Softwaretechnik durch die Informatik bereits an dem Mangel an vereinheitlichenden formalen Prinzipien, so ist mit dem Wandel der Programmierung von einer reinen Rechentechnik zu einer Regelungs-, Steuerungs-, Simulations- und Wissenstechnik zudem zunehmend deutlicher hervorgetreten, daß viele grundlegenden Fragen der Programmierung keine formalen Fragen sind. Die Notation eines Programms ist eine formale Tätigkeit, die Modellierung seines Gegenstandsbereichs hingegen ist dies nicht. Und häufig übertrifft die Relevanz des kontextspezifischen Wissens und die Modellierung die Bedeutung der formalen Prinzipien, auf denen ein softwaretechnisches System basiert.¹⁹⁰

Mit dem Vordringen der Softwaretechnik in immer weitere und komplexere Anwendungsbereiche ließen sich deshalb die Spezifikationen der Systeme

nicht mehr (Interview XLIV).

190 In aller Deutlichkeit trat dies erstmals mit der Diskussion um Softwareergonomie und ergonomische Modelle der Mensch-Maschine-Kommunikation hervor (vgl. ausführlich Pateau 1990). Krückeberg stellte dazu fest: »Bei der Gestaltung von Informationssystemen als Mensch-Maschine-Systemen kommt den bereichs- und organisationspezifischen Besonderheiten, das heißt den aufgabenmäßigen Unterschieden, den aufbau- und ablaufstrukturellen Eigenarten, den arbeitsorganisatorischen bis hin zu den personenbezogenen Besonderheiten mindestens das gleiche, häufig ein größeres Gewicht zu als den zu beachtenden technischen Kriterien der zu entwickelnden beziehungsweise einzusetzenden Hardware- und Softwaresysteme« (Krückeberg 1990: 299).

me immer weniger »von innen nach außen« festlegen. Die Qualitätsmerkmale der Systeme wurden vielmehr in zunehmendem Maße von »außen nach innen« bestimmt, da »die Kriterien, die gute und schlechte Lösungen unterscheiden«, von den formalen Modellen und Methoden »nicht mitgeliefert werden, sondern aus lebensweltlichen, ökonomischen und sozialen Zusammenhängen kommen« (Luft 1988: 2).

Selbst eine perfekte Verifikationstechnik könnte nur beweisen, daß ein System eine gegebene Anforderung korrekt erfüllt, nicht jedoch, ob die Anforderungen an das System korrekt formuliert sind. Genau aber dieses Problem hat mit den immer komplexeren Aufgaben der Softwaretechnik auch immer mehr an Gewicht gewonnen. In dem Maße, wie sich die Programmierung zu einer Regelungs- und Realzeittechnik entwickelt hat, in der Umweltereignisse und nicht-deterministische Prozesse eine zunehmend wichtigere Rolle spielen, ist es immer schwieriger geworden, alle Situationen vorauszusehen, die potentiell eintreten können, und entsprechende Vorkehrungen gegen widersprüchliche Anforderungen an das Verhalten des Systems zu treffen.

So gehen zahlreiche Unfälle, die sich in den vergangenen Jahren bei einer Reihe von softwaregesteuerten Jets ereigneten, nicht auf formale Fehler der Software, sondern auf unvorhergesehene Situationen zurück, in denen die Systeme logisch völlig korrekt die falschen Maßnahmen einleiteten (Wiener 1994: 94–95). In ähnlicher Weise war es kein formaler »bug« im Vermittlungsprogramm, sondern eine von den Entwicklern nicht vorausgesehene Konstellation, die im Januar 1990 dazu führte, daß sich die Knotenpunkte des öffentlichen Telefonnetzes in den USA in einer Kettenreaktion nacheinander selbst abschalteten und einen Totalausfall des Systems bewirkten (ebd.: 119–121). Beispiele solcher Art machen deutlich, daß der korrekten Definition der Anforderungen an ein Softwaresystem zumindest die gleiche Bedeutung zukommt, wie seiner formalen Korrektheit.

Sie zeigen aber auch, daß das informatische Wissen prinzipiell unvollständig ist. Die Informatik verfügt über formales »know-how«, nicht jedoch das erforderliche »know-why« über die Bedingungsbeziehungen der natürlichen, technischen oder sozialen Prozesse, die mit der Hilfe von Softwaresystemen simuliert, kontrolliert oder automatisiert werden sollen. Letztere entziehen sich der formalwissenschaftlichen Theoriebildung, gehen erst aus ihren jeweiligen speziellen Anwendungskontexten hervor und müssen auf induktiv-empirischen Wegen gewonnen werden.¹⁹¹ Die Softwaretechnik ist

191 So konstatiert etwa David L. Parnas: »Computers and software are now replacing more conventional technologies, but the people who design the new systems need to under-

damit wie kaum eine andere Technik auf das Wissen der Anwender angewiesen, zugleich aber entzieht sich dieses Wissen einer bloßen »Akquisition« durch die Entwickler der Programme. Dies hat in unfreiwilliger Weise vor allem die Renaissance und das erneute Scheitern der KI-Forschung in Form der Expertensystemtechnik oder auch sogenannten praktischen bzw. symbolischen KI-Forschung im Verlauf der achtziger Jahre gezeigt.

6.6 Vages Wissen und tiefe Modellierungen – Lehren aus der Renaissance der KI-Forschung

Die Renaissance der KI-Forschung ging diesmal ebenfalls nicht aus der Wissenschaft und Informatik hervor, sondern wurde wie bereits die KI-Forschung der fünfziger und sechziger Jahre forschungspolitisch induziert. Für die etablierte Informatik kam diese Renaissance völlig überraschend und insbesondere die formalistische Schule hat diesen Forschungszweig heftig bekämpft.¹⁹² Seine Wiedergeburt war »ein Konstrukt der Wissenschaftspolitik« (Ahrweiler 1995b: 119), die den Versprechungen einer am Ende der siebziger Jahre noch kleinen Gemeinschaft von KI-Forschern, über eine neue Schlüsseltechnologie zu verfügen, Glauben schenkte, »ohne daß in dieser Hinsicht auf geglückte Beispiele Bezug genommen werden konnte« (ebd.: 119).¹⁹³

Die ausbleibenden Erfolge bei der Simulation menschlicher Kognitionsprozesse und gescheiterte Projekte wie der »general-problem-solver« führten die KI-Forschung am Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre zu

stand fundamental engineering systems as well as did the engineers who designed those older systems« (Parnas 1990: 20). Genau hierin liegt auch das zunehmend gravierendere Problem der Informatik: »Während man aber Wissen über Programmstrukturen in verhältnismäßig kompakter Form aus der Wissenschaft in die Praxis transportieren kann, ist dies naturgemäß für umfangreiches Faktenwissen nicht ohne weiteres möglich. Wie diese Lücke im Sinne des lebenslangen Lernens geschlossen werden kann, wird für viele der heute im Beruf stehenden Entwickler ein immer schwierigeres Problem« (Goos 1994: 13).

192 Den Kampf der etablierten Informatik gegen die KI-Forschung beschreibt ausführlich Petra Ahrweiler (1995a: 62–66).

193 Mainzer interpretiert die Entwicklung der KI-Forschung ganz im Kuhnschen Sinne als Phasenverlauf und ihre »harte« Variante als präparadigmatische Stufe, die mit der »weichen« Version durch ein paradigmatisches Stadium abgelöst wurde (vgl. Mainzer 1994: 115).

dem Schluß, »daß intelligente Leistungen vielfach ein umfangreiches Wissen über den jeweiligen Anwendungsbereich erfordern« (Neumann 1990: 339). Man nahm an, daß die frühen KI-Projekte hauptsächlich deshalb gescheitert waren, weil sie sich zu sehr an allgemeinen Problemlösungsprinzipien orientiert hatten, während menschliche Intelligenzleistungen immer auf Spezialkenntnissen über bestimmte Problemgebiete beruhen. Da es die wachsenden Verarbeitungskapazitäten der Hardwaresysteme zugleich ermöglichten, immer größere Datenmengen zu verarbeiten, verschob sich damit das Ziel der KI-Forschung auf die Entwicklung von Inferenzmaschinen, die Wissen über ein bestimmtes Spezialgebiet speicherten und selbsttätig Schlußfolgerungen ziehen und Problemlösungen anbieten konnten.

Diese sogenannte »weiche« oder auch praktische bzw. symbolische KI-Forschung gab sich im Vergleich zur »harten« KI-Forschung der fünfziger und sechziger Jahre bescheidener und nahm ihre Ansprüche, was die Simulation menschlicher Intelligenz anging, deutlich zurück. Der Wechsel von der »Intelligenz«-Metapher zur »Wissens«-Metapher signalisierte eine »pragmatische Wende« (Malsch 1991) dieses Forschungszweiges, der mit dem »knowledge engineering« jetzt eher technische Ziele anstrebte. Im Prinzip aber hielt auch die »weiche« KI-Forschung an dem »promethischen Anspruch, denkende Maschinen bauen zu können« (Ahrweiler 1995b: 111) fest, wenngleich sie diesen Anspruch nicht mehr so emphatisch formulierte, wie dies noch die harte KI-Forschung tat.

In den siebziger Jahren traf diese neue Variante der KI-Forschung zunächst nur auf geringe Resonanz und beschränkte sich auf ein »invisible college« (Mullins 1973; Ahrweiler 1995a: 84), das keine »kritische Masse« besaß, um ein wissenschaftliches Netzwerk zu konstituieren. Die wenigen Forscher oder Forschergruppen, die sich mit Fragen der KI beschäftigten, arbeiteten weitgehend unabhängig voneinander und verfügten weder über fest institutionalisierte Kommunikationsforen noch über nennenswerte öffentliche Fördermittel. In der Bundesrepublik befaßten sich Mitte der siebziger Jahre um die dreißig Einzelpersonen mit Fragen der KI-Forschung, die gegen Ende des Jahrzehnts dann zwar eine lose verknüpfte »KI-Gemeinschaft« bildeten, allerdings mehr durch ihre Gegnerschaft zur etablierten Informatik als durch gemeinsame Forschungsprobleme zusammenfanden. Die öffentliche Förderung der KI-Forschung beschränkte sich hier zu dieser Zeit auf vier bis fünf kleinere Projekte (Ahrweiler 1995a: 81). In den USA gab es zwar eine gewisse personelle, institutionelle und forschungspolitische Kontinuität zwischen der »harten« und »weichen« KI-Forschung, doch auch dort glich die Situation im wesentlichen der in der Bundesrepublik, und das wis-

senschaftliche und politische Interesse an diesem Forschungszweig hielt sich während der siebziger Jahre in engen Grenzen (ebd.: 156).

Dies änderte sich dann am Beginn der achtziger Jahre in der Folge des »Fifth Generation Programme« der japanischen Regierung, in dem die Forschung über wissensbasierte KI-Systeme eine zentrale Rolle einnahm, fast schlagartig. Mit diesem 1981 angekündigten und mit rund fünf Milliarden DM ausgestatteten Programm löste die japanische Regierung geradezu eine Lawine auf dem Gebiet der KI-Forschung und Expertensystemtechnik aus. Japans Versuch, sich einen Vorsprung in der Wissensverarbeitung zu sichern, löste in den USA und Europa die Befürchtung aus, den Zug in Richtung auf eine neue Zukunftstechnologie zu verpassen und führte zu einem internationalen Wettlauf um die Führungsrolle auf diesem Gebiet (dazu ausführlich: Coy/Bonsiepen 1989). Japans »Fifth Generation Programme« hatte damit zur Folge, daß die Forschungspolitik weltweit ein Forschungsfeld »adoptierte« (Ahrweiler 1995b: 115), das ohne externe Unterstützung über den Status einer kleinen und fragilen Gemeinschaft vermutlich nicht hinausgekommen wäre.

Ohne die nötige finanzielle, d.h. also auch wissenschaftspolitische, Unterstützung von KI-Forschungsprojekten wäre die »kritische Masse« an Wissenschaftlern für eine stabile Etablierung als Scientific Community nicht lange zu halten gewesen. (Ahrweiler 1995a: 85)

Als Folge der förderungspolitischen Maßnahmen aber wuchs die Zahl der KI-Forscher allein in der Bundesrepublik von 1979 bis 1989 von dreißig auf über fünftausend an.

Eine Ausnahme machte jedoch Großbritannien. Dort hatte die KI-Forschung seit dem »Lighthill-Report« von 1973, der ihre bisherigen Ergebnisse sehr kritisch beurteilte, ihr Renommee weitgehend verloren. Als Reaktion auf diesen Bericht drosselte die Regierung Großbritanniens die Förderung dieses Forschungszweiges empfindlich und verhinderte damit, daß in England eine institutionalisierte »KI-Gemeinde« entstehen konnte (Fleck 1982; Ahrweiler 1995a: 62–63, 168).

Obwohl neben Lighthill auch andere Experten der Expertensystemtechnik wie Gill (Gill 1986), die Brüder Dreyfus (Dreyfus/Dreyfus 1987) oder Schank und Childers (Schank/Childers 1986) vor übertriebenen Erwartungen warnten, galt die wissensbasierte KI dagegen in Japan, den USA und vielen anderen europäischen Ländern als eine »killer technology« (Feigenbaum/McCorduck/Nii 1988: 106), die die konventionellen Methoden der Programmierung rasch ablösen und die Softwaretechnik in ein Zeitalter der

Massenproduktion katapultieren würde. Mit der Expertensystemtechnik glaubte man über eine neue Basistechnologie zu verfügen, die es ermöglichte, die konventionellen Methoden der Programmierung zu überwinden und auf die Entwicklung von formalen Algorithmen weitgehend verzichten zu können. Ihr erklärtes Ziel war es, auf Expertise und Fachwissen beruhende Intelligenzleistungen, angefangen bei der Finanz- und Anlageberatung, der medizinischen Diagnostik und Spracherkennung über die industrielle Produktionsplanung und Fertigungssteuerung bis hin zur Notfallregulierung in nuklearen Anlagen durch wissensbasierte Inferenzsysteme zu ersetzen (Coy/Bonsiepen 1989: 4). Mit Hilfe solcher Systeme hoffte man ebenso, die Softwarekrise bewältigen und die Softwareproduktion rationalisieren und standardisieren zu können.

Diese Annahme ging unter anderem auf die durchaus innovative Idee zurück, Expertensysteme in eine Wissensbasis und eine Inferenzmaschine oder »shell« aufzuteilen. Während die Wissensbasis bei diesem Verfahren die jeweilige »Wissensdomäne« abbildet und die erforderlichen Daten und Wenn-Dann-Regeln enthält, werden die logischen Schlußfolgerungen durch die davon unabhängige Inferenzmaschine gezogen (Coy/Bonsiepen 1989). Diese Trennung ermöglicht es, die Wissensbasis warten und aktualisieren zu können, ohne die Inferenzmaschine verändern zu müssen. Damit ließen sich standardisierte Shells einsetzen, mit denen eine kommerzielle Massenproduktion von Expertensystemen möglich scheint (Frederichs 1995).

Jedoch ähnlich wie bereits im Fall der »harten« KI-Forschung wurde es gleichermaßen um die neue, »weiche« Variante dieses Forschungszweiges sehr bald still. Die Expertensystemtechnik hat sich weder als die universelle Basistechnik erwiesen, als die sie noch Anfang der achtziger Jahre betrachtet wurde, noch hat sie zu einer Standardisierung und Rationalisierung der Programmierung geführt. Wie Coy und Bonsiepen bemerken, galt der von Japan initiierte internationale Wettlauf vielmehr einem Zug, der aufgrund ungelöster technischer und epistemologischer Probleme nie abgefahren ist (Coy/Bonsiepen 1989: 3). Expertensysteme eignen sich durchaus zur Lösung spezieller und nicht allzu komplexer Probleme, aber der mit ihnen angestrebte große Durchbruch zum umfassenden »knowledge engineering« blieb aus.

Zunächst einmal führen die Expertensysteme ähnlich wie die Verifikationsverfahren sehr schnell zu nicht mehr beherrschbaren Komplexitätsproblemen. Bereits einfache Aufgaben machen sehr umfangreiche Systeme erforderlich, und wo menschliche Experten immer noch in »traumwandlerischer Sicherheit« (Coy/Bonsiepen 1989: 50) agieren, zeigt es sich im Fall der Wissenstechnik, »daß Fakten und Regeln, verkoppelt durch etliche tau-

send Wenn-Dann-Regeln, sehr rasch in unlösbare Wartungsprobleme geraten« (Zemanek 1991: 65).

Ganz abgesehen von den Wartungsproblemen der Expertensysteme, scheitert dieser Zweig der KI-Forschung im wesentlichen bereits an den Problemen der Wissensextraktion, die, wie schon der Begriff signalisiert, zunächst als ganz und gar unproblematisch galt. Mit diesem Begriff verband sich die Vorstellung, daß sich die Kenntnisse und Regeln, mit denen Experten Probleme lösen, schlicht und einfach »akquirieren« oder gar »absaugen« (McNeill/Freiberger 1994: 334) ließen. Tatsächlich aber ist »die Wissensakquisition beileibe keine rein technische Frage« (Coy/Bonsiepen 1989: 59). Experten können ihr Wissen in der Regel nicht explizieren, obwohl sie erfolgreich Probleme lösen. Ihr Wissen ist vage, und sie beschreiben ihre Vorgehensweisen vorwiegend anekdotisch, anhand von Beispielen und typischen Situationen. Wie die Erfahrung lehrt, besteht sogar eine inverse Beziehung zwischen ihrer Problemlösungskompetenz und ihrem Vermögen, zu begründen, wie und warum sie zu bestimmten Schlußfolgerungen gelangen. »The more competent domain experts become, the less able they are to describe the knowledge they use to solve problems« (Waterman, zitiert nach Coy/Bonsiepen 1989: 51). Wer viele Experten zu ein und demselben Problem befragt, wird außerdem viele unterschiedliche und inkommensurable Antworten erhalten.

Statt in die Massenproduktion führt die Expertensystemtechnik in die aufwendige und zeitraubende Rekonstruktion des jeweiligen Einzelfalls und seiner stets nur vage definierten Problemstellungen. Sie ist weniger eine »killer technology« mit der sich die Programmierung umfassend rationalisieren und standardisieren ließe, als vielmehr ein kompliziertes programmiertechnisches Handwerk. So zeigte sich sehr bald,

daß die Erstellung eines praxisfähigen KI-Produkts nur zu einem geringen Teil das zum Inhalt hat, was man im akademischen Verständnis als KI bezeichnen würde. Der Hauptanteil der Arbeit wird durch herkömmliche Software-Entwicklung beansprucht, und zwar der am wenigsten attraktiven Art: Die Transformation einer vagen Aufgabenbeschreibung in schier endlose Fallunterscheidungen und das minutiöse Sammeln von fallspezifischem Material.

(Frederichs 1995: 355)

Dem vagen Charakter des Wissens von Experten entsprechend lassen die Systeme in der Regel nur approximative Lösungen zu und müssen explorativ und inkrementell entwickelt, ständig gewartet und aktualisiert werden.¹⁹⁴

194 Aufgrund des vagen Charakters der Regeln, denen Experten folgen, gibt es keine ein-

»Im strengen Sinne«, so Werner Beuschel, kann man »auch nicht von Wissensverarbeitung sprechen«. Die Entwicklung eines Expertensystems muß »eher als ›Übersetzung‹ vorhandenen Wissens in ein Artefakt verstanden« werden und »keinesfalls als ›Abbild‹« der Problemlösungskapazitäten von Experten (Beuschel 1995: 301). Ebenso haben Winograd und Flores schon früh betont, daß das, was die KI-Forschung als Akquisition von Wissen bezeichnet, kein Prozeß des »Absaugens« von Wissen, sondern ein kreativer Gestaltungsprozeß (Winograd/Flores 1986) ist, in dem die Experten und die Entwickler der Systeme auf heuristischem Wege Theorien und Modelle eigener Ordnung über bestimmte Problemgebiete erzeugen. Statt von Wissensingenieuren sollte man Puppe zufolge angesichts der kreativen Leistungen, die die Entwicklung von Expertensystemen erfordert, besser von »Wissenskünstlern« reden (Puppe 1988).

Auch die wirtschaftlichen Erfolge der Expertensystemtechnik sind »bisher eher dürftig« (Ahrweiler 1995b: 112) und blieben weit hinter den Erwartungen der frühen achtziger Jahre zurück. Genaue Angaben über die Verbreitung dieser Technik liegen allerdings nicht vor. Dies hängt unter anderem damit zusammen, daß es keine verlässlichen Definitionskriterien dafür gibt, was ein »echtes« Expertensystem ausmacht. Mißt man solche Systeme an den Kriterien der akademischen KI-Forschung, so reduziert sich deren Zahl auf kaum mehr als vier bis fünf Programme wie »MYCIN«, ein System zur medizinischen Diagnose, und »R1/XCON«, mit dem die Firma DEC die Komponenten ihrer Rechnersysteme konfiguriert.¹⁹⁵ Zählt man dagegen auch aus akademischer Sicht »triviale« Anwendungen hinzu, so existieren jedoch einige tausend solcher Systeme. Dies spricht dafür, »daß sich Expertensysteme mit einem gegenüber dem derzeit propagierten eher reduzierten Anspruch durchsetzen« werden, wie Werner Beuschel in seiner Studie über die potentielle Verbreitung dieser Technik feststellte (Beuschel 1995). Mit Sicherheit gibt es einen Markt für die Expertensystemtechnik, aber dieser Markt ist vergleichsweise klein und sein Anteil am Gesamtum-

deutigen Kriterien dafür, ob die Wissensbasis eines Systems das relevante Entscheidungswissen vollständig und korrekt abbildet. Wissensbasierte Systeme lassen sich sozusagen nur durch Beobachtung verifizieren (Partridge 1986). Dies hat der Expertensystemtechnik den Ruf eingebracht, zur »super software crisis« zu führen (Partridge 1986), und macht ihren Einsatz in sicherheitsrelevanten Bereichen hoch problematisch.

195 Diese beiden Programme zählen zu den ältesten Systemen der Expertensystemtechnik überhaupt und sind über einen Zeitraum von rund zwanzig Jahren kontinuierlich weiterentwickelt worden (Coy/Bonsiepen 1989: 90–99).

satz an Softwareprodukten betrug in der Bundesrepublik am Ende der achtziger Jahre erst etwa ein Prozent (Coy/Bonsiepen 1989: 82).

Zudem beschränkt sich der betriebliche Einsatz von Expertensystemen auf eng umgrenzte und gut zu strukturierende Wissensdomänen. Der Weg in die Wissensverarbeitung wird in der betrieblichen Praxis »weniger mit Hilfe großer, anspruchsvoller Systeme beschritten, als vielmehr mit überschaubaren, alltagsnahen Entwicklungen« (Beuschel 1995: 326), die in die vorhandenen DV-Techniken einbezogen werden. Es geht in der Praxis im übrigen nicht darum, Entscheidungen zu automatisieren und Experten zu ersetzen, sondern sie durch wissensbasierte Systeme zu unterstützen (Degele 1995: 282). Der aus den Systemen »gezogene Gewinn liegt in einer höheren Nutzungsrate der DV-Technik und einer verbesserten Konsistenz der Entscheidungen« (Beuschel 1995: 327).

In den Augen von Frederichs ist somit auch kein Massenmarkt für Expertensysteme in Sicht, sondern vielmehr ein Marktpotential für kundenspezifische Lösungen, die in hochkomplizierten iterativen Prozessen und in enger Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern entwickelt werden müssen. Die Wissensverarbeitung hat damit einen Entwicklungstrend fortgesetzt und verstärkt, den Arndt Sorge bereits für die konventionelle Softwareproduktion konstatierte: »Die Gestaltung der Software muß sich mehr und mehr auf den jeweils spezifischen Einzelfall einstellen und der Bereich der Software wird damit immer stärker differenziert« (Sorge 1985: 95). Sie wird mit einem immer breiteren Spektrum von speziellem und anwendungsspezifischem Wissen konfrontiert, das die »Vertiefung« in die »Komplexität des Einzelfalls« erfordert (Frederichs 1995: 355), für den jeweils eine spezielle Näherungslösung entwickelt werden muß.

6.7 Unscharfe Systeme – neue Perspektiven der Wissensverarbeitung

Die KI-Forschung selbst verlor denn auch schon sehr bald das Interesse an den Expertensystemen. Heute treffen diese Systeme dort nur noch auf ein randständiges Interesse (Coy/Bonsiepen 1989; Ahrweiler 1995a). Nach den enttäuschenden Erfahrungen mit diesen Systemen wandten sich am Ende der achtziger Jahre große Teile der KI-Forschung den Neuronalen Netzwerken und dem konnektionistischen Ansatz zu, der damit nun ebenfalls eine Re-

naissance erlebte.¹⁹⁶ Das Konzept der Neuronalen Netzwerke ging bereits auf den Aufsatz von Frank Rosenblatt über »Perzeptronen« (Rosenblatt 1958) aus den späten fünfziger Jahren zurück, wurde aber durch die symbolische KI-Forschung und hier insbesondere durch eine Arbeit von Marvin Minsky und Seymour Papert zurückgedrängt, in der sie diesen Ansatz als Sackgasse und nicht durchführbar beschrieben hatten (Minsky/Papert 1969). Die im Verlauf der achtziger Jahre immer deutlicher hervortretenden Unzulänglichkeiten der symbolischen Logik für die Simulation von Intelligenzleistungen weckten dann allerdings ein erneutes Interesse am Konnektionismus.

Das Ziel dieses Ansatzes besteht darin, mit Hilfe massiv parallel arbeitender Systeme den Aufbau und die Verbindungen von Nervenzellen nachzuahmen und selbständig lernende Neuronennetze zu entwickeln.¹⁹⁷ Einige Anfangserfolge bei der Simulation sehr einfacher Lernprozesse haben auch hier – ähnlich wie im Fall der Expertensystemtechnik der symbolischen KI-Forschung – zu der Überzeugung geführt, daß man nun mit den neuronalen Netzen über den Schlüssel für den Bau intelligenter Maschinen und über eine neue und universelle Basistechnik verfüge. Diese neue Basistechnik sollte die Methoden der konventionellen Programmierung im Rahmen einer »Neuro-Informatik« ablösen, da es möglich schien,

mit neuronalen Netzen relativ rasch Systeme erstellen zu können, die ihre Aufgaben durch Lernen, Training und Erfahrung erledigen, also ohne die sehr aufwendigen Programmierarbeiten des Softwareengineering und ohne die teuren Wartungsprobleme. (Duden Informatik 1993: 471)

Doch wie bereits in der harten und dann der weichen KI-Forschung folgte auch im Fall des konnektionistischen Ansatzes der anfänglichen Euphorie rasch Ernüchterung. So wie die Expertensysteme eignen sich neuronale Netze für begrenzte Einsatzbereiche und spezielle Aufgabenstellungen, aber der Konnektionismus ist gleichermaßen weit davon entfernt, die konventionel-

196 Insbesondere durch die Arbeiten von Hopfield und Tank (1985) bzw. Rumelhardt und McClelland (1986).

197 In zufällig verknüpften Schaltungen sollen durch positive und negative Rückkoppelungen Lerneffekte erzeugt werden, die mit Hilfe von statistischen Modellen über das Verhalten der Netze Rückschlüsse auf die Funktionsweise biologischer Nervenzellen zulassen (vgl. Rechenberg 1991: 247–248). Das Netzwerk probiert »viele verschiedene Muster aus, empfängt für die Annäherung an die Lösung eine Belohnung, verändert die Gewichtungen und wendet dieses Schema wieder und wieder an« (McNeil/Freiberger 1994: 330).

len Methoden der Softwareproduktion überflüssig zu machen und die Programmierung durch intelligente und lernende Maschinen zu automatisieren.¹⁹⁸ Wie sich rasch abzeichnete, liegen die Anwendungsgebiete der Neuronalen Netze hauptsächlich im Bereich der Mustererkennung und Sensorik, und auf diesem Gebiet haben sie in den vergangenen Jahren zu durchaus beachtlichen Fortschritten geführt. Dieser Ansatz hat der Softwaretechnik erneut ein großes Aufgabenfeld und eine neue Wissensdomäne erschlossen, doch »die anfängliche Faszination und Mystik des Reizwortes ›Künstliche Intelligenz‹ ist längst verflogen« (Dengel 1994: 12). Das Forschungsfeld hat kaum mehr Anhänger, und der Begriff KI ist derzeit desavouiert.¹⁹⁹

Zugleich ging nach den ernüchternden Erfahrungen mit dem Faszinosum KI auch die öffentliche Förderung dieses Forschungszweiges am Beginn der neunziger Jahre massiv zurück. Die Forschungspolitik in der Bundesrepublik hat die Förderung der KI-Forschung bis auf wenige Projekte, die in den kommenden Jahren definitiv auslaufen sollen, eingestellt (Ahrweiler 1995b: 119–120). Dennoch dürfte es sich dabei nicht um einen »klammheimlichen Ausstieg« (ebd.: 119) der staatlichen Politik aus der Förderung der Expertensystemtechnik und der Forschung über Neuronale Netzwerke handeln, wie Petra Ahrweiler dies vermutet (ebd.: 119–120), da sich wieder einmal mehr durch neue Verzweigungen und Kombinationsmöglichkeiten neue Perspektiven für diese beiden Forschungsgebiete eröffnet haben.

So tat sich parallel zum Niedergang der symbolischen KI-Forschung mit der sogenannten Fuzzy logic, der bis zu diesem Zeitpunkt weder in der Informatik und KI-Forschung noch in der staatlichen Forschungspolitik Beachtung geschenkt wurde, eine attraktive Alternative in der Expertensystemtechnik auf, die zu einer Vielzahl von neuen Anwendungsmöglichkeiten und neuen Produkten führte. Ähnlich wie die Neuronalen Netze wurde auch die Fuzzy logic als Reaktion auf die Unzulänglichkeit der zweiwertigen Logik für die Simulation menschlicher Intelligenzleistungen am Ende der achtziger Jahre wiederentdeckt. Dieser Ansatz ging bereits Mitte der sechziger Jahre aus Arbeiten von Lotfi A. Zadeh über nicht-monotone Logiken hervor, war

198 So konstatiert heute Andreas Dengel, einer der führenden Verfechter des Konnektionismus in der Bundesrepublik: »Zwar kann man konnektionistischen Modellen, ebenso wie der Symbolmanipulation, eine gewisse intellektuelle Leistung zubilligen, doch auch sie scheitern letztlich an der Begrenztheit der Hilfskonstruktionen, welche sie selbst darstellen« (Dengel 1994: 12).

199 Die KI-Forschung wurde von dem grundlagentheoretisch orientierten und sehr heterogenen Fach mit dem neuen Namen »cognitive science« abgelöst, dessen Schicksal noch völlig ungewiß ist.

aber »etwa 25 Jahre lang nur im akademischem Bereich bekannt, und zwar als heftig umstrittene Theorie, die vielen Wissenschaftlern in den USA, in Europa und im fernen Osten zunächst als Stein des Anstoßes galt« (Zimmermann 1994: 7). Als eine Theorie der unscharfen Mengen oder auch eine »präzise Theorie des Unpräzisen« (Demant 1993), die mit Wahrheitswerten wie »sehr wahr«, »eher wahr« und »nicht sehr falsch« arbeitet (McNeill/Freiberger 1994: 104), galt sie in der Informatik allgemein und in der symbolischen KI-Forschung im besonderen als »Scharlatanerie«, die »jeder mathematischen Grundlage« entbehrte (ebd.: 16).²⁰⁰

Als hoch umstrittene, in der Informatik ignorierte und vom Mainstream der KI-Forschung bekämpfte Theorie hat sich die Fuzzy logic dann auch nicht auf einem innerwissenschaftlichen Weg, sondern über technische und kommerzielle Anwendungen zu einem heute allgemein anerkannten Denkmodell entwickelt. Während sich in den USA und Europa bis weit in die achtziger Jahre nur wenige Mathematiker und Informatiker mit der Fuzzy logic beschäftigten, erkannten Praktiker in der japanischen Industrie am Ende der siebziger, Anfang der achtziger Jahre ihren potentiellen Nutzen und setzten sie mit wachsendem kommerziellen Erfolg vor allem in der Regelungstechnik ein.²⁰¹

Ende der achtziger Jahre wurde dann zunehmend deutlich, daß sich die Anwendungsmöglichkeiten der Fuzzy logic nicht nur auf die Regelungstechnik beschränkten, sondern sie sich ebenso für die Wissensverarbeitung und Entwicklung von Expertensystemen eignete und dabei entscheidende Vorteile gegenüber den Systemen der symbolischen KI-Forschung aufwies. In der unscharfen Logik der Fuzzy sets läßt sich vages Wissen in einer präzisen Form darstellen.²⁰² Sie eignen sich damit in besonderer Weise für die

200 Noch 1989 wurde sie von führenden Repräsentanten der symbolischen KI-Forschung als eine »temporäre Idiosynkrasie« (McNeil/Freiberger 1994: 300) ohne praktische Bedeutung bezeichnet.

201 Das erste kommerzielle Produkt, das aus der Theorie der unscharfen Mengen hervorging, war eine durch Fuzzy logic gesteuerte Duschanlage. Dieser ersten kommerziellen Anwendung folgte dann eine Fülle von innovativen und wirtschaftlich sehr erfolgreichen Produkten. Fuzzy-Logic-Systeme werden heute in wachsendem Maße für das Management von Videokameras, Mikrowellenherden, Waschmaschinen, Automotoren, Aufzügen, U-Bahnen und ganzen Industrieanlagen eingesetzt (vgl. Zimmermann 1994).

202 Während die Inferenzmaschinen der symbolischen KI-Forschung mit Wahr/Falsch-Entscheidungen arbeiten und die Entscheidungsregeln der Wissensbasis deshalb vollständig spezifiziert sein müssen, erlaubt es die Fuzzy logic, Entscheidungsprobleme als kontinuierliche Übergänge zwischen sich überlappenden Teilmengen darzustellen, für die unscharfe Wenn-Dann-Regeln gelten, die dem Muster entsprechen: Wenn die Tem-

Darstellung von Erfahrungswissen, das nicht auf kausale Prinzipien zurückgeführt werden kann, und haben damit zudem den Vorteil, daß sie mit einer wesentlich geringeren Anzahl von Regeln auskommen als die wissensverarbeitenden Systeme der symbolischen KI-Forschung.²⁰³

Im Zuge der Renaissance des Konnektionismus zeigte es sich am Ende der achtziger Jahre darüber hinaus, daß sich die Fuzzy logic in fruchtbarer Weise mit Neuronalen Netzwerken zu regelbasierten und adaptiven Neuro-Fuzzy sets verbinden ließ.²⁰⁴ Damit drang die Wissensverarbeitung und Expertensystemtechnik in solche Felder vor, auf denen die Mustererkennung eine Schlüsselrolle spielt, wie beispielsweise bei der Identifikation von Handschriften, Lauten oder Aromen, wo sie derzeit zunehmend konventionelle Techniken ersetzt und neue softwaretechnische Anwendungen ermöglicht.²⁰⁵

Das Spektrum der Anwendungsmöglichkeiten von Fuzzy logic und Neuro-Fuzzy-Systemen läßt sich derzeit noch nicht ausmachen. Sicher ist nur, daß sie der Wissensverarbeitung neue Möglichkeiten eröffnet haben, die erneut in die »Tiefe« des spezialisierten und anwendungsspezifischen Wissens anderer Techniken führen. Dies spiegelt sich ebenfalls in der Forschung über Programmiersprachen wider. Unscharfe Programmiersprachen zur Verarbeitung von vagem Wissen sind ein derzeit aktuelles Forschungsthema in der theoretischen Informatik (McNeill/Freiberger 1994: 359–362). Sie scheinen sich vor allem für eine Erneuerung der objektorientierten Programmierung zu eignen (Interview VI).

peratur ein wenig zu niedrig ist, dann erhöhe sie etwas; wenn die Temperatur sehr niedrig ist, dann erhöhe sie sehr stark (vgl. z.B. Demant 1993).

- 203 So scheiterte etwa die softwaretechnische Steuerung von Zementbrennöfen lange Zeit daran, daß im Inneren solcher Öfen ein ausgesprochenes chemikalisches Durcheinander herrscht und sich die theoretischen Modelle für die Temperaturregulierung als zu kompliziert und unpraktikabel erwiesen. Zugleich aber benötigte ein Arbeiter lediglich etwa acht Wochen Anlernzeit, um einen Zementofen bedienen zu können. Wie sich bei der Entwicklung eines durch Fuzzy logic gesteuerten Systems für einen solchen Zementofen herausstellte, mußte er lediglich siebenundzwanzig unscharfe Wenn-Dann-Regeln beherrschen, die ausschließlich auf Erfahrungswissen beruhten (McNeill/Freiberger 1994: 166–171).
- 204 Die Pionierarbeit hierzu lieferte »Neuronal Networks and Fuzzy Systems« von Bart Kosko (1993).
- 205 Neuronale Netze können einfache Muster erkennen, aber keine Regeln erzeugen. In der Kombination mit Fuzzy sets lassen sich den Netzen jedoch bestimmte Regeln als Input vorgeben, die sie durch ihren Output wiederum verändern. Neuro-Fuzzy-Systeme arbeiten also nicht mehr nach dem Zufallsprinzip und ändern ihre Gewichtungen nicht mehr nur durch bloßes Ausprobieren ab, sondern auf der Basis von vagem Wissen, das sie durch Umgewichtungen sukzessive anpassen und verfeinern (McNeill/Freiberger 1994: 331).

Offen ist derzeit auch der Ausgang des internationalen Konkurrenzkampfs, den erneut die japanische Regierung auf dem Gebiet der Fuzzy logic ausgelöst hat. Japans Ministry for International Trade and Industry (MITI) gründete 1989 das Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE), das über ein Budget von sechzig Millionen Dollar verfügt, und leitete damit einen »dramatischen Wettbewerb« (Zimmermann 1994: 11) zwischen Japan, den USA und Europa um die Führungsrolle auf diesem Gebiet ein. Auch in Deutschland erlebte die Fuzzy logic im Zuge dieses plötzlich und unerwartet einsetzenden internationalen Wettbewerbs großen Auftrieb; seine Auswirkungen auf die Forschungspolitik in der Bundesrepublik liegen aber noch im unklaren.²⁰⁶

6.8 Zwischen Formalisierung und Verstehen – die duale Struktur der Informatik

Die Informatik entspricht recht genau dem Typ einer fragmentierten »adhocracy«, wie sie das organisationssoziologische Modell von Richard Whitley beschreibt. Sie bietet heute das Bild eines amorphen und wenig integrierten Forschungsfeldes, das seine fokalen Themen und identitätsbildenden Ziele weitgehend verloren hat und dessen Forschungsprioritäten in starkem Maße fluktuieren. So stellt etwa der Informatiker Bernd Mahr fest, daß sein Fach als Folge des rasanten technischen Wandels und der »drängenden Förderpolitik« (Mahr 1989: 62) »wie keine andere Wissenschaft ... den Trends der industriellen Entwicklung« unterliegt (Mahr 1984: 104). Viele Forschungsthemen, mit denen es sich befaßt, »entstehen, veralten und verschwinden wie Modeerscheinungen« (ebd.: 104).

Zugleich hat es sich mit dem Vordringen der Softwaretechnik in immer neue Anwendungsbereiche in immer vielfältigere und heterogenere Forschungsgebiete aufgefächert. Niemand überblickt heute mehr die Forschungsansätze und Forschungsaktivitäten auf diesem Feld, geschweige denn, daß sie kumulativ aufeinander aufbauen. Besaß die Informatik mit den Algorithmen, den formalen Sprachen und den Verifikationsverfahren zu Beginn der siebziger Jahre noch eine überschaubare Zahl von fokalen Themen, so

206 Die öffentliche Förderung dieser neuen Technologie beschränkt sich zur Zeit im wesentlichen auf einzelne Bundesländer und hier vor allem auf die »Fuzzy-Logic-Initiative« des Landes Nordrhein-Westfalen (Interview XLV).

wurden, ohne daß diese Themen an Aktualität verloren hätten, mit dem rasanten Wandel der Softwaretechnik

ganz andere Fragen aufgeworfen: die Mittel der Beschreibung, die Strukturen der Organisation, die Formen der Kommunikation, die Prinzipien des Entwurfs, das Verhalten der Prozesse, die Werkzeuge der Entwicklung, das Modell der Benutzung oder die Auswirkungen der sozialen Einbettung. (Mahr 1989: 62)

Im Zuge dieser Diversifikation der Informatik sind auch immer neue Spezialitäten wie die Wirtschafts- und Betriebsinformatik, Bioinformatik, medizinische Informatik, Rechtsinformatik oder Verwaltungsinformatik entstanden. Diese Spezialgebiete gehen weitgehend unabhängig von der formalen informatischen Theoriebildung anwendungs- und problemspezifischen Fragen nach und weisen zum Teil starke Verselbständigungstendenzen gegenüber der stark theoretischen Kerninformatik auf. So übt etwa die Wirtschafts- und Betriebsinformatik bereits seit langem heftige Kritik an der primär formalwissenschaftlichen Ausrichtung der Kerninformatik und ihrer Orientierung an mathematischen Modellen der Programmierung.²⁰⁷ Dort ist es in den vergangenen zwei Jahrzehnten immer wieder zu Bestrebungen gekommen, sich durch die Gründung einer eigenständigen wissenschaftlichen und beruflichen Vereinigung auch institutionell von der Kerninformatik zu lösen (Interview XXX).

Diese Verselbständigungstendenzen und Konflikte machen deutlich, daß mit dem Wandel der Softwaretechnik von einer Rechentechnik zu einer universellen Querschnitts- und ubiquitären Alltagstechnik zugleich die Grundlagen erodiert sind, auf denen das Selbstverständnis der Informatik als einer reinen Formalwissenschaft aufbauen konnte. War es unter den Bedingungen der späten sechziger Jahre, in denen sich die Programmierung in der Hauptsache auf eine Rechentechnik beschränkte, noch möglich, das Fach als Wissenschaft von den Algorithmen zu definieren, so hat es mit dem Vordringen der Softwaretechnik in ein immer breiteres Anwendungsspektrum mit einer

207 Im Falle anderer Spezialitäten wie etwa der Rechtsinformatik ist dagegen nie deutlich geworden, was den Kern dieser Teilgebiete ausmacht und worin ihre spezifische Nähe zur Informatik liegt. Die Rechtsinformatik entstand am Ende der sechziger Jahre, weil man glaubte, daß die Rechtsprechung eine besondere Nähe zur formalen Logik und Mathematik aufweise. Aus ihr hervorgegangen sind dann aber im wesentlichen juristische Datenbanken und Informationssysteme, die sich nicht grundlegend von anderen bibliotheks- und dokumentationswissenschaftlichen Systemen unterscheiden, während die Rechtsinformatik selbst im Verlauf der siebziger und achtziger Jahre der Devolution verfiel. Sie spielt auch in der Rechtswissenschaft nur eine randständige Rolle (Interview X).

zugleich immer »tieferen« Modellierung der Objektbereiche eine ausgesprochene Doppeldidentität als formale und empirisch-hermeneutische Disziplin entwickelt. Es weist heute eine duale Aufgabenstruktur auf, die kognitiv und sozial weitgehend auseinanderfällt.

Als Formalwissenschaft unterscheiden sich die Aufgabenstellungen der Informatik nicht wesentlich von der Mathematik. Die Entwicklung der Algorithmen und Formalismen erfolgt weitgehend unabhängig von den Anforderungen an die programmiertechnische Praxis und ist Gegenstand der Konkurrenz zwischen den »peers« einer relativ autonomen internationalen wissenschaftlichen Gemeinschaft von theoretischen Informatikern (Interview VI; Interview XII). Der Bedarf an formalen Spezifikationen ist bekannt, und ein Problem definitiv gelöst, wenn ein Algorithmus existiert. Ist ein »Lösungsalgorithmus entdeckt und ausformuliert worden, dann kann das Problem als »entwertet« angesehen werden« (Duden Informatik 1993: 29). Die Lösung kann in Zeitschriften oder Datenbanken publiziert werden, und die wissenschaftliche Diskussion kann sich neuen Fragestellungen zuwenden. Während die Informatik als Formalwissenschaft eine hohe relative Autonomie besitzt und gar keiner engen Koppelung mit den Anwendern bedarf, wird sie als hermeneutische Wissenschaft stark »von außen nach innen« bestimmt. In dieser Funktion ist sie wie wohl kaum ein anderes Forschungsfeld auf das Wissen und die enge Kooperation mit den Anwendern angewiesen und muß sich von den »user insights« (von Hippel 1988: 111) in die jeweilige Aufgabenstellung leiten lassen. Die Problemstellungen und die Problemlösungen müssen hier in iterativen Schritten und in Interaktion mit den Anwendern approximiert werden.

Diese Doppeldidentität der Informatik spiegelt sich gleichfalls in dem erneuten Streit wider, der gegen Ende der achtziger Jahre um die curricularen Aufgaben und das wissenschaftliche Selbstverständnis des Fachs ausgebrochen ist (vgl. dazu auch Bonsiepen/Coy 1982; Pflüger 1994). Dieser Streit wurde von der Forderung Dijkstras nach einer radikalen Rückbesinnung der Informatik auf ihre mathematischen Grundlagen ausgelöst. Dijkstra will eine »Brandmauer« zwischen dem errichten, was er als das »Pleasantness-« und das »Correctness-Problem« der Programmierung bezeichnet. Die Informatik habe sich ausschließlich auf der Seite des Correctness-Problems aufzuhalten und alles außen vor zu lassen, was mit den Mitteln der Formalisierung und logischen Umformung nicht zu erreichen ist und nicht der korrekten Umsetzung von Spezifikationen in maschinell ausführbare Algorithmen dient. Er kritisiert in diesem Zusammenhang das »kindliche« anthropomorphe Bild, das vor allem die KI-Forschung vom Computer entwerfe. Das einzige, was

der Computer wirklich könne, sei die logische Manipulation von Symbolen, und nur die mathematische Modellierung ermögliche einen angemessenen Umgang mit der Komplexität dieser Maschine. Die Programmierung liefe deshalb auf nichts anderes als auf die Anwendung formaler Methoden hinaus und verlange eine entsprechend »grausame« Ausbildung der Informatiker (Dijkstra 1989).

Andere prominente Vertreter der formalistischen Schule wie etwa David Gries schlossen sich der Forderung Dijkstras an. Ihrer Ansicht werden in der Informatik professionelle Standards nicht mit der notwendigen Disziplin eingehalten, wie sie in anderen Ingenieurwissenschaften selbstverständlich ist. Dieser Mangel an Professionalität schließe sich in der miserablen Qualität der Software nieder und sei nur durch eine strenge mathematische Ausrichtung der akademischen Ausbildung zu überwinden (Bonsiepen/Coy 1992). Zu einer ähnlichen Schlußfolgerung kommt ebenfalls David Parnas, in dessen Augen die Informatik zu rasch gewachsen ist und allzu vielfältiges und heterogenes Wissen in ihre Lehrpläne aufgenommen hat. Parnas kritisiert, daß sich die akademische Lehre zu sehr an den Interessen der Praxis orientiere, statt sich auf die mathematischen Grundlagen des Programmierens zu konzentrieren und den Studierenden professionelle Tugenden zu vermitteln (Parnas 1990).

Der Versuch, die Informatik auf eine Formalwissenschaft zu reduzieren, trifft heute allerdings auf immer weniger Zustimmung. Der Konsens, daß es sich bei der Informatik um eine formale Strukturwissenschaft handle, ist mittlerweile zerbrochen. Die formalistische Schule sieht sich seit einiger Zeit der wachsenden Kritik einer »intuitionistischen« oder auch »realistischen« Position ausgesetzt (Bonsiepen/Coy 1992: 324), die in der Informatik nicht mehr nur einen Zweig der Mathematik und Logik sieht und sich von formalen Methoden keinen Durchbruch für die Bewältigung der Softwareproblematik verspricht.

Frederick P. Brooks (1995) zufolge erklärt der Begriff der Softwarekrise etwas zu einer kritischen Ausnahmesituation, was stets zur Normalität der Softwareproduktion gehören wird. Softwaresysteme, so Brooks, enthalten grundsätzlich und unabänderlich Fehler, selbst wenn sie mit größtem formalem Aufwand entworfen und implementiert worden seien. Keine der bisher entwickelten formalen Methoden habe zu einem qualitativen Sprung in der Softwareproduktion geführt oder werde zu einem solchen Sprung führen. Es gibt, so Brooks, »no silver bullet« (ebd.: 358), mit der sich der Werwolf Komplexität auf glorreiche Weise ein für allemal erlegen ließe. Eine höhere Produktivität der Programmierung und qualitativ höherwertige Pro-

dukte ließen sich nicht mit Hilfe einer einzelnen Technik, sondern nur durch inkrementelle Verbesserungen auf allen Ebenen der Softwareherstellung realisieren.

Die Probleme der Softwaretechnik seien heute nicht mehr von »akzidenteller« Natur und nicht durch einen strengeren Einsatz formaler Instrumente zu bezwingen, sondern von »essentiellem« Charakter (ebd.: 359). Programmieren werde immer schwieriger, und das größte Problem bestünde heute nicht einmal mehr darin, formal korrekte Programme zu entwickeln, sondern die korrekten Anforderungen an die Systeme zu ermitteln. Selbst Experten sei es in der Regel nicht möglich, ihr Wissen zu explizieren, und um so weniger ließe es sich von Anwendern erwarten, daß sie die Aufgaben, die ein Softwaresystem im einzelnen erfüllen soll, formulieren könnten.

For the truth is the client does not know what he wants. The client usually does not know what questions must be answered, and he has almost never thought of the problem in the detail necessary for specification. (ebd.: 371)

Es gehöre deshalb zu den schwierigsten und anspruchsvollsten Aufgaben der Programmierung überhaupt, das für die Spezifizierung der Anforderungen an die Systeme erforderliche Wissen der Nutzer zu mobilisieren. Das größte Problem bei der Entwicklung eines Softwaresystems, so Brooks, »is not the labor of representing and testing the fidelity of the representation« (ebd.: 359).

The hardest single part of building a software system is deciding what to built. No other part of the conceptual framework is as difficult as establishing the detailed requirements, including all the interfaces to people, to machines, and to other software systems. No other part of the work so cripples the resulting system if done wrong. No other part is more difficult to rectify later. Therefore the most important function that the software builder performs for the client is the iterative extraction and refinement of the product requirements. (ebd.: 370–371)

Dementsprechend sei es für die Entwicklung komplexer Softwaresysteme unabdinglich, »to allow an extensive iteration between the client and the designer as part of the system definition« (ebd.: 371).

Die Sichtweise von Brooks, der seine Kritik an der formalistischen Schule primär aus der Sicht der softwaretechnischen Praxis formuliert, wird heute auch von einer Reihe von prominenten Vertretern des Fachs wie Nygaard oder Winograd und Flores geteilt, die in der Theoretischen Informatik mit ihren Methoden der formalen Spezifikation »keine ausreichende Theorie der Informatik« (Coy 1992b: 22) mehr sehen. Selbst der Komple-

xitätstheoretiker Karp, der seine eigene wissenschaftliche Arbeit hauptsächlich formalen Modellen widmet, hält Dijkstra entgegen, »daß formale Beweise und formale Spezifikationen nicht zu den vielversprechendsten Wegen gehören, um brauchbare und zuverlässige Ergebnisse mit der Hilfe von Rechnern zu erhalten« (Karp 1989: 4). Nygaard betont, »programming is to understand« und konzeptualisiert die Programmierung als einen genuin sozialen und interaktiven Prozeß. Er faßt die Informatik nicht mehr als Wissenschaft von den Algorithmen im engeren Sinne, sondern als eine Disziplin, deren Objektbereich durch Informationsprozesse in der Natur, Technik und Gesellschaft gebildet wird und rückt sie in die Nähe der Geistes- und Sozialwissenschaften (Nygaard 1986). Winograd und Flores halten der formalistischen Schule entgegen, mit der Definition des Computers als einer symbolverarbeitenden Maschine von falschen Prämissen auszugehen. Im Kern möge der Computer eine symbolverarbeitende Maschine sein. Die Symbolverarbeitung sei aber nur ein Mittel für Zwecke, die außerhalb der Reichweite formaler Methoden lägen.²⁰⁸

In ähnlicher Weise wenden sich heute auch neuere Theorien des Software-engineerings gegen das traditionelle Modell des Softwarezyklus als eines Phasenmodells der Programmierung, das einen kaum mehr generalisierbaren und eher trivialen Spezialfall darstellt. Konnte man zu einer Zeit, als die Softwaretechnik noch primär eine reine Rechentechnik war, davon ausgehen, daß die Programmierung eine von den Anwendern weitgehend unabhängige Tätigkeit von Spezialisten sei und sich die Entwicklung eines Programms in klare und voneinander getrennte Stadien einteilen ließ, so hat dieses präskriptive Leitbild heute nur noch eine sehr eingeschränkte Geltung.

Die neueren Theorien des Softwareengineerings unterscheiden drei Klassen von Programmen. Programme, deren Probleme spezifizierbar sind und deren Lösungen richtig oder falsch sein können, Programme, deren Probleme zwar ebenso eindeutig spezifizierbar sind, bei denen aber nach pragmatischen Gesichtspunkten darüber entschieden werden muß, ob die Lösungen akzeptabel sind oder nicht, sowie Programme, deren Probleme in soziale Handlungskontexte und Arbeitssituationen eingreifen und eingebettet sind und nur vor diesem Hintergrund definiert werden können (Floyd 1994). Das Phasenmodell des Softwarezyklus ist nur im Fall von Programmen der ersten Klasse, und damit nur für relativ einfache Produkte, angemessen. In dem Maße hingegen, wie der Grad der Ungewißheit über die Anforderungen

208 Winograd und Flores (1986). Vgl. zu dieser Diskussion auch: Luft (1988, 1992), Floyd (1987), Ehn (1988).

an die Systeme ansteigt und es nicht mehr um Unterscheidungen wie »richtig« oder »falsch«, sondern um Urteile wie »mehr oder weniger geeignet« geht, stellt sich die Programmierung als ein iterativer Prozeß dar, in dem es während des gesamten Verlaufs eines Softwareprojekts der Verständigung zwischen den Produzenten und Anwendern über die Spezifikation der Systeme bedarf.

Dementsprechend betonen die neuen Theorien des Softwareengineering den evolutionären, interaktiven und partizipativen Charakter der Softwareentwicklung.²⁰⁹ So argumentiert etwa Christiane Floyd, daß sich die Ziele von Softwareprojekten in der Regel nicht a priori festlegen lassen, sondern sich erst im Rahmen dialogischer und diskursiver Prozesse zwischen den Beteiligten und »in einem Geflecht von ineinander verwobenen Designentscheidungen« (Floyd 1994: 34) allmählich herauskristallisieren, die »dem Entwickler eine graduelle Erschließung des Problems, eine kontinuierliche Bewertung und Revision von Entwurfsentscheidungen und eine allmähliche Abrundung der angebotenen Leistungen« ermöglichen (ebd.: 34). Es gibt keine »richtige Methode« zur Erschließung und Bewertung von Entwurfsentscheidungen. Die Designentscheidungen können vielmehr nur in »Erkenntnis- und Aushandlungsprozessen« festgelegt werden, in denen die Produzenten die Wahrnehmungen der Anwender und die Anwender die Wahrnehmungen der Produzenten verändern und »ein allmählich wachsendes Verständnis darüber, was eigentlich hergestellt werden soll, zwischen den Beteiligten konkretisiert wird« (ebd.: 35). Eine graduelle Steigerung der Softwarequalität erhoffen sich die »Intuitionisten« primär von Konzepten wie dem »rapid prototyping« und von Softwaretools, mit deren Hilfe die Anwender systematisch in den Produktionsprozeß der Systeme eingebunden werden können.

Mit der wachsenden Kritik des »intuitionistischen« Lagers und seinen Gegenentwürfen zum traditionellen Modell vom Softwarezyklus hat die formalistische Schule heute ihren Alleinvertretungsanspruch für die Informatik weitgehend eingebüßt. Das Renommee ihrer führenden Vertreter ist zunehmend verblaßt. Informatiker wie Dijkstra, Hoare, Bauer, Wirth und ihre Schüler genießen zwar ein hohes Ansehen, weisen der Forschung aber nicht mehr den Weg und führen einen aussichtslosen Kampf um die Selbstdiszi-

209 In ähnlicher Weise wendet sich Brooks gegen die Metapher, daß Softwaresysteme »gebaut« werden. In seinen Augen gehört diese Metapher in die späten sechziger und frühen siebziger Jahre. Die komplexen Softwaresysteme von heute werden nicht »gebaut«, sondern »grown up« (Brooks 1995: 371–372).

plinierung und Selbstbeschränkung der Programmierung auf formal beherrschbare Systeme (ähnlich auch Cerruzzi 1985). Zugleich aber ist auch keine neue Lehre und kein neues Reputationszentrum entstanden, um das sich die Informatik hätte formieren können. Das Fach besaß nur für kurze Zeit in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren eine richtungsweisende Elite und ist heute ein Forschungsgebiet ohne Spitze und Zentrum.

Kapitel 7

Steuerungsprobleme der informatischen Großforschung und die Performanz der Kontextsteuerung

7.1 Die Odyssee der GMD

Vor dem Hintergrund der vorangegangenen Abschnitte kann nun auch deutlich werden, warum die informatische Großforschung anders als ihr kern-technisches Vorbild nie auf einen stabilen Erfolgskurs gekommen ist. So wie sich die Informatik im Sinne des Modells von Whitley selbst als eine »adhocracy« mit fluktuierenden Forschungsprioritäten und mangelnden theoretischen und methodischen Standards präsentiert, ist auch niemals Klarheit über die Forschungsziele und Aufgabenstellungen der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) entstanden. Vielmehr litt diese Forschungsorganisation von Beginn an unter starken Zielambiguitäten und hat zu keiner Zeit eine klare Identität entwickelt.

Während sich als Folge der geordneten Prioritäten in der Kerntechnik auch ein stabiles forschungspolitisches Netzwerk herausbilden konnte, in dem die Großforschungseinrichtungen in Karlsruhe und Jülich gewissermaßen die zentralen Knotenpunkte bildeten und durch das sich ihre Forschungsaufgaben langfristig festlegen ließen, ist in der informatischen Großforschung nie ein solches Netzwerk entstanden. Die Beziehungen zwischen Wissenschaft, Politik und Wirtschaft waren stets brüchig und von wechselnden Akteurskonstellationen mit unterschiedlichen und sich rasch wandelnden Zielvorstellungen gekennzeichnet. Die Forschungspolitik hat sich hier nie an stabilen Reputationszentren orientieren können, die ihr die Richtung gewiesen hätten, und soweit sie zeitweise den Konzepten bestimmter Forscher oder Forschergruppen folgte, schlug sie stets prekäre Wege ein, über die der Konsens zwischen den beteiligten Akteuren rasch zerbrach. So zieht sich denn auch die vergebliche Suche nach der »großen« und großforschungsspezifischen Aufgabe für die GMD wie ein roter Faden durch die Entwicklungsgeschichte der Gesellschaft, während ihre organisatorische

Struktur als Folge des raschen technischen Wandels, der ständigen Verzweigungen und fluktuierenden Forschungsprioritäten in der Informationstechnik und Informatik faktisch stets durch eine Vielzahl unzusammenhängender Projekte gekennzeichnet war, die auf kontingente und immer wieder revidierte forschungspolitische Entscheidungen zurückgingen. Zugleich gibt es in der Informatik und Informationstechnik auch kein Großgerät, wie dies die Kernphysik besaß und besitzt und um das sich die Forschung zentrieren könnte. Konnte es in den sechziger Jahren noch so scheinen, als seien Computer ähnlich den Reaktoren und Detektoren der Kernphysik große technische Anlagen, die sozusagen das Gravitationszentrum der Forschungsaktivitäten bildeten, so ging diese Möglichkeit mit der Aufspaltung der Computertechnologie in symbolische und physikalische Maschinen und der hierdurch induzierten mikroelektronischen Revolution vollends verloren. In dem Maße wie die Rechenzentren von immer leistungsfähigeren dezentral verteilten Systemen abgelöst wurden und sich der Programmierung immer größere Gestaltungschancen eröffneten, stellte sich auch eine wachsende Entkoppelung der Forschungsaktivitäten ein, die sich in zunehmend heterogenere Forschungsansätze aufspalteten.

Dementsprechend hat die GMD auch nie Kontinuität in ihren Projekten entwickeln können. Soweit es im Verlauf der Entwicklungsgeschichte der Gesellschaft überhaupt zur Bildung von Forschungsschwerpunkten kam, wurden die dort verfolgten Ziele immer wieder in Frage gestellt, durch neue und unvorhergesehene Entwicklungen abgelöst und die Forschungsergebnisse nicht selten entwertet. Außerdem erwiesen sich viele Forschungsziele, die von der GMD aufgegriffen wurden, später als nicht realisierbar beziehungsweise von sehr viel geringerem Nutzen als erwartet, während andere Forschungsansätze, die sich später als erfolgreich erwiesen, unbeachtet blieben. Das Risiko, gewissermaßen »auf das falsche Pferd zu setzen«, ist auf einem so komplexen und dynamischen Feld wie der Informationstechnik und Informatik sehr hoch und wird dazu noch durch den auf der Forschungspolitik lastenden Druck gesteigert, Projekte definieren zu müssen, mit denen sich die Organisationsform der Großforschung legitimieren läßt.

Die Projekte der GMD und der Transfer ihrer Produkte sind aber auch immer wieder an den faktischen Standards der Informationstechnik gescheitert. Die Hoffnung, mit einer informatischen Großforschungseinrichtung softwaretechnische Normen durchsetzen zu können, hat sich angesichts der globalen Bandwagonprozesse, auf deren Basis sich diese Standards herausbilden, genausowenig erfüllt, wie die entsprechende Erwartung an die Informatik. Doch auch auf der Ebene der internationalen Standardisierungsko-

mitees hat die GMD mit ihren Entwicklungen als Folge wirtschaftspolitischer Interessenkonflikte stets Schiffbruch erlitten.

Scheitert der Versuch, die »große« und großforschungsspezifische Aufgabe der GMD zu definieren, bereits am raschen technischen Wandel, den ständigen Verzweigungen und fluktuierenden Forschungsprioritäten, so hat die duale Struktur der Informatik mit ihrer großen Kluft zwischen der methodischen Grundlagenforschung und der softwaretechnischen Entwicklung darüber hinaus zur Folge, daß die Gesellschaft im Unterschied zu den Kernforschungszentren auch keine funktionale Arbeitsteilung mit hoher Fertigungstiefe und stabilen »Lieferbeziehungen« zwischen der Grundlagenforschung und Anwendungsforschung entwickeln konnte. Sie hat vielmehr wie die Informatik selbst eine segmentäre Struktur hervorgebracht, in der sich die Grundlagenforschung und die technische Entwicklung der GMD weitgehend unverbunden gegenüberstehen. Die organisatorische Klammer, die die GMD um diese beiden divergenten Bereiche legt, ist deren Entfaltung zudem eher hinderlich.

Soweit es um die Entwicklung konkreter Softwaresysteme geht, die in handwerklicher Detailarbeit und in enger Kooperation mit den späteren Nutzern erstellt werden müssen, handelt es sich weder um großforschungsspezifische Aufgaben noch um Projekte, denen die institutionelle Struktur der Großforschung sonderlich förderlich ist. Diese Struktur setzt keine Anreize, die Arbeit der GMD an den Bedürfnissen der Anwender zu orientieren und schafft eher motivationale Probleme, da sie ein professionelles Selbstverständnis ihres wissenschaftlichen Personals begünstigt, das mit den stark handwerklichen Anforderungen des Softwareengineering und der Notwendigkeit, sich intensiv mit den Problemen des jeweiligen Einzelfalls auseinanderzusetzen zu müssen, konfligiert.

Zugleich aber kann sich im Rahmen der informatischen Großforschung auch die methodische Grundlagenforschung nicht entfalten. Als Großforschungseinrichtung muß sich die GMD deutlich von der Hochschulforschung abgrenzen und sich auf eine unmittelbar anwendungsorientierte Grundlagenforschung beschränken. Dies führte immer wieder zu dem Versuch, die Grundlagenforschung eng mit softwaretechnischen Aufgaben zu verzahnen und in ein serielles Transfermodell zu integrieren, obwohl beide Bereiche in der Informatik nicht eng gekoppelt sind und auch keiner engen Koppelung bedürfen. Die organisatorische Struktur der GMD schnürt beide Forschungsrichtungen sozusagen in ein institutionelles Korsett ein, das zusammenhält, was nicht notwendigerweise zusammengehört, und sie zugleich in ihren Entwicklungsmöglichkeiten behindert.

Soweit es die softwaretechnische Forschung betrifft, zeigt sich dies vor allem im Vergleich zu den entsprechenden Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft. Während die Entwicklung der GMD einer Odyssee gleicht, hat die FhG seit dem Ende der siebziger Jahre mit dem Modell der industriellen Auftrags- oder Vertragsforschung einen sehr stabilen Erfolgskurs in der Informationstechnik einschlagen können. Dabei dürfte ihr Erfolgsgeheimnis gerade darin bestehen, daß sich die Frage nach der »großen« integrativen Aufgabe dieser Forschungsorganisation und ihrer Institute erst gar nicht stellt und die FhG zumindest im Bereich der Informationstechnik auch keine institutionelle Verklammerung der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung mit einer entsprechend hohen Fertigungstiefe anstrebt.

Die Forschungsziele der FhG und ihrer informationstechnischen Institute entstehen nicht »top down«, sondern »bottom up« in enger Interaktion mit der Industrie. Das institutionelle Modell, für das diese Einrichtung steht, läuft auf eine forschungspolitische Kontextsteuerung (Willke 1983; Teubner/Willke 1984; Hohn/Schimank 1990: 271–231) hinaus, in deren Rahmen die staatliche Politik darauf verzichtet, die Prioritäten vorzugeben und sich auf eine variable Grundförderung beziehungsweise Anreizfinanzierung der Forschungsorganisation beschränkt, die letztere zur Selbststeuerung und Selbstanpassung befähigt. Es entspricht einem Adressatenmodell von Forschungsorganisation, das sowohl die Zielambiguitäten als auch die motivationalen Probleme, mit denen die GMD zu kämpfen hat, vermeidet. Dieses Modell richtet die Forschung der Institute unmittelbar am Bedarf der Industrie aus und setzt zugleich hohe Anreize für die in der Softwaretechnik erforderliche enge Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern der Systeme. Seine Funktionsweise ist damit den Anforderungen der angewandten informationstechnischen Forschung wesentlich besser angepaßt als die institutionelle Form der Großforschung, beruht aber gerade darauf, daß es Fragen der methodischen Grundlagenforschung weitgehend ausklammert, nur lose mit ihr gekoppelt ist und sich im wesentlichen auf die technische Seite des Softwareengineering konzentriert. Dies bietet der angewandten Informationstechnik sehr viel größeren Entfaltungsspielraum als das Modell des seriellen Forschungstransfers, das die GMD verfolgt, dem aber die Informatik anders als die Kernphysik nie entsprach und wohl auch auf absehbare Zeit nicht entsprechen wird.

Der folgende Vergleich der Entwicklung der informatischen Großforschung mit dem Modell der forschungspolitischen Kontextsteuerung, wie sie im Fall der FhG praktiziert wird, kommt zu der Schlußfolgerung, daß man die forschungspolitische Rolle, organisatorische Struktur und Finanzierungs-

form der GMD neu überdenken sollte. Es ist nicht zu sehen, was gegen eine Ausgliederung der methodischen Grundlagenforschung aus der Gesellschaft an die Hochschulen und eine »Fraunhoferisierung« ihrer angewandten informationstechnischen Forschung spricht.

7.2 Fehlstart – informatische Großforschung als Mathematik

Die Entwicklungsgeschichte der informatischen Großforschung ist von ihren Anfängen an eine Geschichte von Richtungskonflikten und ungelösten Identitätsproblemen.²¹⁰ So wurde bereits die Gründung der GMD im Jahr 1968 von heftigen Auseinandersetzungen über die Ziele und das Forschungsprogramm der Gesellschaft überschattet. Diese Konflikte gingen darauf zurück, daß die Bundesregierung zum damaligen Zeitpunkt noch in die »Zuständigkeit« der Mathematik für die Datenverarbeitung vertraute und den Aufbau der Gesellschaft zunächst einer Gruppe von renommierten Mathematikern überlassen hatte, sich aber nur zwei Jahre später und unter maßgeblicher Beteiligung des Bundesministeriums für wissenschaftliche Forschung (BMwF) die Informatik auch in der Bundesrepublik als Hochschulfach etablierte, das sich deutlich von der Mathematik abgrenzte und deutlich andere Ziele als diese Disziplin verfolgte.

Bis zur Gründung der GMD am Ende der sechziger Jahre hatte sich die institutionelle Forschungslandschaft auf dem Gebiet der Datenverarbeitung in der Bundesrepublik gegenüber den frühen fünfziger Jahren nicht wesentlich verändert. Als Folge des »Königsteiner Staatsvertrags«, mit dem die Länder 1949 die Forschungsförderung zu ihrer alleinigen und gemeinschaft-

210 Die folgende Darstellung der Entwicklung der GMD stützt sich, vor allem was ihre Vorgeschichte und Gründungsphase angeht, streckenweise auf die Monographie von Josef Wiegand zur »Geschichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung« (1994). Diese Monographie enthält viele empirische Hinweise, an die dieses Kapitel anknüpfen konnte, die jedoch nicht ausreichten, um seine forschungsleitende Frage zu beantworten. Es erwies sich vielmehr als notwendig, über die Arbeit von Wiegand hinaus, die Jahresberichte und Forschungspläne der GMD heranzuziehen und spezielle finanzstatistische Daten zur Entwicklung der Gesellschaft zu erheben. Darüber hinaus beruht die folgende Darstellung auf 24 Interviews mit meist leitenden Mitarbeitern der GMD, denen ich an dieser Stelle für ihre Unterstützung und für ihre Bereitschaft, sich auf meine Fragen einzulassen, danken möchte. Mein Dank gilt natürlich auch meinen Gesprächspartnern in der FhG, die sich mit nicht minder großem Engagement meinen Fragen stellten.

lichen Aufgabe erklärt hatten, blieben der Bundesregierung mit Ausnahme der Ressortforschung und der Förderung der Kernphysik als eines Forschungsfeldes von »gesamtstaatlichem« Interesse die Hände in der bundesdeutschen Forschungspolitik bis zum »Verwaltungsabkommen über die Förderung von Wissenschaft und Forschung« von 1964 gebunden (Hohn/Schmank 1990: 344–386). Dementsprechend war es ihr bis 1964 auch versagt, sich auf dem Gebiet der elektronischen Datenverarbeitung forschungspolitisch zu engagieren, während die Forschungspolitik der Länder mit Ausnahme des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW) diesem Feld keine besondere Bedeutung zumaß. Bis zur Mitte der sechziger Jahre war es deshalb im wesentlichen bei den computerwissenschaftlichen Instituten in Göttingen sowie in Darmstadt und München, aus denen Mitte der fünfziger Jahre die ZMD-Gruppe und ALGOL hervorgegangen waren, und einigen wenigen programmiertechnischen Lehrstühlen an elektrotechnischen oder mathematischen Fakultäten geblieben. Zu den Hochschuleinrichtungen trat 1954 lediglich noch das vom Land NRW gegründete Institut für Instrumentelle Mathematik (IIM) an der Fakultät für Mathematik der Universität Bonn hinzu.

Die einzige Einrichtung in der elektronischen Datenverarbeitung, bei der die Länder nach langjährigen Verhandlungen einer Beteiligung der Bundesregierung zugestimmt hatten, war das Deutsche Rechenzentrum in Darmstadt (DRZ), das der Bund gemeinsam mit dem Land Hessen unterhielt. Für ihre Beteiligung an dieser Einrichtung hatte die Bonner Regierung allerdings entgegen ihrer ursprünglichen Hoffnung den Preis zahlen müssen, daß sich die Aktivitäten des Zentrums im wesentlichen auf Dienstleistungen zu beschränken hatten und es ihm nicht gestattet war, in größerem Umfang Forschung zu betreiben.

Die Beilegung des forschungspolitischen Konflikts mit den Ländern durch das Verwaltungsabkommen von 1964 eröffnete dem Bund dann aber stark erweiterte forschungspolitische Handlungsspielräume, während die Länder mehr und mehr eine Konsolidierung ihrer Forschungshaushalte anstrebten. Nach 1964 war der Bund frei, auch auf anderen Gebieten als der Kerntechnik und Ressortforschung eigene Einrichtungen zu unterhalten und konnte auch zunehmend in bilaterale Verhandlungen mit den Ländern eintreten. Mit dem Verwaltungsabkommen von 1964 waren Bund und Länder in der Forschungspolitik zu einem bis heute stabilen Interessengleichgewicht gelangt, das dann 1969 auch zu einer Änderung des Grundgesetzes führte, mit der die Forschungsförderung zu einer Gemeinschaftsaufgabe erklärt wurde.

Die ersten Pläne des Bundes, eine Großforschungseinrichtung auf dem Gebiet der Datenverarbeitung zu gründen, gingen ebenfalls bereits auf das Jahr 1964 zurück und nahmen dann im Zuge der Diskussion um die »wissenschaftlich-technologische Lücke« (Servan-Schreiber 1968) und der wachsenden Sorgen um die künftige internationale Wettbewerbsfähigkeit der Bundesrepublik Gestalt an (Mainzer 1979: 145). Neben der Kerntechnik galt das Feld der elektronischen Datenverarbeitung als die zweite große Zukunftstechnologie, auf dem die Bundesrepublik einen großen Nachholbedarf besaß und wo es galt, den Anschluß vor allem an die USA nicht zu verlieren. In dieser Situation bot es sich an, das Modell der Großforschung auch auf die Informations- und Datenverarbeitung zu übertragen. Die Forschungszentren in Karlsruhe und Jülich befanden sich Mitte der sechziger Jahre mit ihren Reaktorentwicklungen auf einem stabilen Erfolgskurs. Man konnte zu dieser Zeit auch durchaus noch davon ausgehen, daß Computer große technische Anlagen waren, um die sich die Forschung ähnlich wie in der Kernphysik zentrierte.

Zugleich aber gab es in der elektronischen Datenverarbeitung keine klar identifizierbaren Reputationszentren oder führenden Forschergruppen, auf die sich das BMWF bei der Einrichtung und der Formulierung der Forschungsziele eines nationalen Zentrums auf diesem Gebiet hätte erfolgreich stützen können. Die Informatik war zu diesem Zeitpunkt noch nicht als akademisches Lehrfach etabliert und für die Programmierung der Rechner und die Weiterentwicklung der Rechentechnik schien noch am ehesten die Mathematik zuständig zu sein, die dieses Feld ja auch im übrigen für sich reklamierte. Dies begünstigte es, daß sich die Forschungspolitik des Bundes in der Gründungsphase der GMD für das Angebot des Landes Nordrhein-Westfalen entschied, das an der mathematischen Fakultät der Universität Bonn angesiedelte IIM zu einer Großforschungseinrichtung auszubauen (Wiegand 1994: 83–98).

Wie die Kernforschungsanlage Jülich (KfA) war auch das IIM eine »Brandt-Stiftung« (vgl. Kap. 3) und auf Initiative des Ministerialdirektors im nordrhein-westfälischen Landesamt für Forschung, Leo Brandt, entstanden. Und wie bereits im Fall der KfA hatte sich NRW auch mit der Gründung des IIM finanziell übernommen und sah nun nach der Beilegung des forschungspolitischen Kompetenzkonflikts mit dem Bund in den Plänen der Bonner Regierung, eine Großforschungseinrichtung auf dem Gebiet der Datenverarbeitung zu schaffen, eine Chance, sich finanziell zu entlasten und zugleich die Zukunft des Instituts zu sichern. Die Entscheidung für das IIM erschien dem Bund dann jedoch schon sehr bald als ein grundlegender Fehl-

griff, der keine zwei Jahre nach Gründung der GMD zur ersten Strukturreform der Gesellschaft führte.

Leiter des Instituts waren mit Ernst Peschel und Heinz Unger zwei hochreputierte »reine« Mathematiker. Die Aufgabe des IIM sollte ursprünglich darin bestehen, »instrumentelle mathematische Methoden zu entwickeln« und mit etwa fünfzig Prozent seiner Kapazität als Serviceeinrichtung und Rechenzentrum für die Industrie tätig zu werden. Peschel und Unger lenkten die Arbeit des Instituts jedoch hauptsächlich auf das Gebiet der numerischen Mathematik, das für sie nicht anders als für das Gros der Mathematiker die Hauptanwendung des Computers darstellte, und wehrten es außerdem erfolgreich ab, sich mit industriellen Auftragsarbeiten befassen zu müssen. Das IIM partizipierte in den fünfziger und sechziger Jahren an dem großen Aufschwung, den die numerische Mathematik durch die Möglichkeit nahm, mit den elektronischen Maschinen immer umfangreichere und komplexere numerische Gleichungen zu berechnen. Es konnte sich auf diesem Feld auch eine beachtliche Reputation erwerben und profitierte dabei nicht zuletzt von seiner relativ großzügigen personellen und maschinellen Ausstattung, die ihm das Land NRW gewährte.²¹¹

Mit den Problemen der Programmierung setzte sich das Institut jedoch nur randständig auseinander und trug mit wenigen Ausnahmen und Nebenprodukten einzelner Mitarbeiter nichts zur Entwicklung der wissenschaftlichen Programmierung bei. Der Computer fungierte im IIM nicht als Gegenstand, sondern hauptsächlich als Instrument der mathematischen Forschung. Der einzige nennenswerte Beitrag des IIM zur Entwicklung der Computerwissenschaft bestand in der Dissertation von Carl Adam Petri über parallele Prozesse und Netztheorie (Petri-Netze). Das IIM zählte auch nicht zum engeren Kreis der computerwissenschaftlichen Institute in Darmstadt, Göttingen und München, sondern stand in einer Konkurrenzbeziehung zu der Gemeinschaft der Computerwissenschaftler in Deutschland und insbesondere der ZMD-Gruppe (Interview II). Während in dieser Gemeinschaft um die Mitte der sechziger Jahre die ersten Bestrebungen aufkamen, die Computerwissenschaft als eigenständiges akademisches Fach zu institutionalisieren, reklamierten die Leiter des IIM den Computer für die Mathematik und betrachteten die Programmierung als Teilgebiet der angewandten Mathematik.

211 Mit rund sechzig Mitarbeitern im Jahr 1964 war es das größte Landesinstitut im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung, und als eine der ersten wissenschaftlichen Einrichtungen verfügte das IIM am Beginn der sechziger Jahre mit der 7090 über den damals leistungsfähigsten Großrechner von IBM (Wiegand 1994: 46).

Wenngleich die Informatiker ihr Ziel sehr bald erreichten, vertraute das Bonner Forschungsministerium beim Aufbau der GMD noch auf den hohen innermathematischen Ruf des IIM, zumal auch eine positive Stellungnahme des Wissenschaftsrates vorlag, der 1965 den weiteren Ausbau des Instituts empfohlen hatte. Da das DRZ aufgrund seiner starken Serviceorientierung dagegen über kein sonderlich großes wissenschaftliches Renommee verfügte, verzichtete der Bund auf die Option, sich bei seinem Vorhaben auf diese Einrichtung zu stützen. Mit der Verabschiedung des 1. DV-Programms der Bundesregierung im Jahr 1967 fiel dann auch die Entscheidung, das IIM in eine Großforschungseinrichtung zu überführen, an der sich der Bund mit zunächst fünfundsiebzig, später neunzig Prozent beteiligte und an der das Land NRW den Rest der Anteile hielt (Wiegand 1994: 106–11).

Im Vertrauen auf ihre Kompetenz ließ das Bonner Forschungsministerium den ehemaligen Leitern des IIM beim Aufbau der GMD in den ersten beiden Jahren auch so gut wie vollkommen freie Hand. Der Gesellschaftsvertrag sah in § 2 vor:

Aufgabe der Gesellschaft ist die Forschung sowie die fachliche und wissenschaftliche Fortbildung in Mathematik und Datenverarbeitung im Hinblick auf die Wechselbeziehungen zwischen den beiden Gebieten im Rahmen des Gesamtprogramms für Datenverarbeitung des Bundes.
(GMD-Jahresbericht 1971: 41)

Diese Aufgabendefinition und vor allem der Begriff der »Wechselbeziehungen« zwischen Mathematik und Datenverarbeitung sollten den »mathematischen Grundcharakter« (Wiegand 1994: 97) der GMD zum Ausdruck bringen, während der Datenverarbeitung explizit eine zweitrangige Rolle zukam.²¹²

Diesem programmatischen Verständnis über die Aufgabe und Identität der GMD entsprechend, bestand die Gesellschaft im Jahr 1970 aus einem Institut für Mathematik, das sich mit der »Anwendung von EDV-Anlagen« auf mathematische Grundlagenfragen befaßte (vgl. GMD-Jahresbericht 1970: 27–31), einem Institut für Angewandte Mathematik, das die »Mathematisierung der Einzelwissenschaften« vorantreiben sollte, und einem Institut für Numerische Datenverarbeitung, »das numerische Verfahren zu entwickeln und hinsichtlich der Verwendbarkeit auf modernen Datenverarbei-

212 Dies kam auch bereits in der Namenswahl der Gesellschaft zum Ausdruck, bei der die Bezeichnung »für Mathematik« bewußt vor dem Begriff »Datenverarbeitung« rangierte (Interview XX).

tungsanlagen zu analysieren, sowie Programme für diese Verfahren zu erstellen« hatte (ebd.: 35).

Zu diesen rein mathematisch orientierten Einrichtungen traten im selben Jahr noch das Institut für Theorie der Automaten und Schaltnetzwerke, das sich mit der algebraischen und topologischen Struktur von Rechenautomaten befaßte, sowie das Institut für Informationssystemforschung von Carl Adam Petri, der mit Hilfe seiner Netztheorie die »Technik der Informationssysteme durch die Gewinnung der theoretischen Einsicht in ihre Struktur« (Jahresbericht GMD 1970: 43) weiterzuentwickeln suchte. Daneben verfügte die GMD über eine Abteilung für Datenverarbeitung und eine Abteilung für behördliche Datenverarbeitungssysteme, deren Aufgaben, wie auch der Bundesforschungsbericht von 1969 feststellte, im Unterschied zu den Instituten von praktischer Natur war.

Die Institute befassen sich vor allem mit der Grundlagenforschung. Die Abteilungen sind dagegen für bestimmte Aufgabenbereiche vorgesehen und stellen die Verbindung zur Praxis her. (Bundesbericht Forschung 1969: 82)

Hatte zunächst Konsens zwischen dem Forschungsministerium und den ehemaligen Direktoren des IIM darüber bestanden, daß die GMD eine primär mathematische Einrichtung sein und die »Wechselbeziehungen« zwischen Mathematik und Datenverarbeitung erforschen sollte, so vollzog das BMwF dann um 1969/70 eine radikale Kehrtwende gegenüber seiner bisherigen Politik und stoppte die Aktivitäten zum weiteren Ausbau der Gesellschaft weitgehend. Diese Kehrtwende ging auf die 1968 einsetzende Diskussion um die Softwarekrise und eine für das BMwF überraschende Initiative zurück, die der Fachausschuß des 1. DV-Programms als Reaktion auf das Curriculum '68 der ACM ergriff. In diesem Fachausschuß waren neben Repräsentanten der früheren ZMD-Gruppe, wie Friedrich L. Bauer, auch andere Computerpioniere aus den Instituten in Darmstadt, Göttingen und München vertreten (Donth 1984).

Die deutschen Computerpioniere nutzten 1968 ihre Sitze im Fachausschuß des DV-Programms und die Diskussion um die Softwarekrise dazu, eine Empfehlung zur Einrichtung eines Studiengangs Informatik zu formulieren, die das BMwF wiederum der Konferenz der Kultusminister, dem Wissenschaftsrat und der Westdeutschen Rektorenkonferenz zuleitete. Noch im selben Jahr gaben die Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GaMM) und die Nachrichtentechnische Gesellschaft (NTG) auf Ersuchen des BMwF eine Stellungnahme zu dieser Empfehlung ab, die ein vorläufiges Curriculum für einen Studiengang Informatik enthielt, das sich

stark an den Vorschlag der ACM anlehnte. Sehr zur Überraschung des BMwF, in dem man zunächst davon ausging, daß die Länder den Vorstoß des Bonner Forschungsministeriums als Eingriff in ihre bildungspolitische Hoheit werten würden, ging die Konferenz der Kultusminister unverzüglich auf dessen Initiative ein und übernahm ihrerseits die Empfehlungen der GaMM und NTG. In den dann folgenden Verhandlungen zwischen der Konferenz der Kultusminister und dem BMwF erklärte sich Bonn bereit, Sondermittel des Bundes für den Aufbau eines Studiengangs Informatik und die Einrichtung von Lehrstühlen und Instituten an den Hochschulen zur Verfügung zu stellen.²¹³ Als zunächst unintendiertes Nebenprodukt hatte das I. DV-Programm der Bundesregierung damit zur Folge, daß sich die Informatik um 1970 in der Bundesrepublik als eigenständige akademische Disziplin etablierte.

Dieses neue Fach grenzte sich in seiner ingenieurwissenschaftlichen Ausrichtung nun aber auch deutlich von der Mathematik ab, die in der Bonner Forschungspolitik bis dahin als die Kern- oder Mutterwissenschaft der Informations- und Datenverarbeitung gegolten hatte, befaßte sich primär mit Forschungsproblemen wie Algorithmen, formalen Sprachen und Compilern, die in der GMD nur sehr randständig bearbeitet wurden, und nahm ausdrücklich Gebiete wie die gesamte numerische Mathematik von seinen Lehrplänen aus. Damit mehrten sich in Bonn nunmehr auch die Zweifel an der überragenden Rolle, die Peschel und Unger der Mathematik im Forschungsprogramm der GMD zuerkannt hatten.

Auch die wachsende Kritik aus der Industrie und den Hochschulen am primär mathematischen Forschungsprogramm der GMD trug dazu bei, daß die ehemaligen Leiter des IIM jetzt den Kredit einbüßten, den ihnen das BMwF beim Aufbau der Gesellschaft zunächst eingeräumt hatte. Zudem wurde es für das BMwF mit der Etablierung der Hochschulinformatik erforderlich, den Anteil der Grundlagenforschung in der GMD generell zu reduzieren und ihr Aufgaben zuzuweisen, die »zwischen« der Forschung an den Universitäten und den Entwicklungsarbeiten der Industrie lagen. Dementsprechend begann man dort bereits 1969 an einem Reformentwurf für die

213 Dieses auf fünf Jahre begrenzte Programm erhielt die Bezeichnung »Überregionales Forschungsprogramm Informatik«, da der Bund nach Artikel 91 b GG nur die Forschung, nicht aber die Lehre an den Hochschulen fördern durfte. Vorsichtshalber wurde das Programm von Bund und Ländern denn auch »niemals unterschrieben und doch viele Jahre erfolgreich praktiziert« (Donth 1984: 226). Auch die Gesellschaft für Informatik (GI) als die wissenschaftliche und berufliche Standesorganisation der Informatiker in Deutschland wurde im Anschluß an eine Sitzung des Fachausschusses in den Räumen des Bonner Forschungsministeriums gegründet.

GMD zu arbeiten, mit dem die mathematische Forschung deutlich zurückgeschnitten und die Gesellschaft primär auf ingenieurwissenschaftliche und softwaretechnische Ziele orientiert werden sollte (Wiegand 1994: 183–186). Die Reformpläne des Forschungsministeriums trafen jedoch auf erheblichen Widerstand in der Geschäftsführung der Gesellschaft. Peschel und Unger wehrten alle Reformversuche des BMwF ab und bestanden auf dem Vorrang der mathematischen Grundlagenforschung in der GMD, die in ihren Augen jetzt als Forschungszentrum in der Theoretischen Informatik fungieren sollte (Interview XX). Diese Position vertrat auch das Land NRW, das noch bis weit in die siebziger Jahre an der grundsätzlich mathematischen Ausrichtung der Gesellschaft festhielt (Interview XIII). Der Vertreter der Düsseldorfer Regierung im Aufsichtsrat der GMD mußte sich aber einer Kurskorrektur durch den Bund als dem größeren Anteilseigner fügen.

Ende 1970 nahm das Bonner Ministerium angesichts des nicht nachlassenden Widerstands der Geschäftsführung das Ruder selbst in die Hand und zog die Entscheidungskompetenz über das Forschungsprogramm und die einzelnen Forschungsprojekte der Gesellschaft weitgehend an sich (vgl. dazu auch Winkelhage 1988). Kaum zwei Jahre nach der Gründung der GMD wurde Unger seiner Amtsgeschäfte enthoben und ein neuer Geschäftsführer eingesetzt, der den Reformzielen des Bundes loyal gegenüberstand.

7.3 Kurskorrektur ohne Landkarte

7.3.1 Erste Strukturreform und die Suche nach der großen Aufgabe

Über klare Vorstellungen, welche Aufgaben die Gesellschaft zu erfüllen hatte, verfügte man indes auch im Bonner Ministerium nicht. Stattdessen begann nun eine fast dreijährige Suche nach der »großen Aufgabe« der GMD, während derer ihr Ausbau weitgehend stagnierte und zunächst auch keine Maßnahmen zu ihrer Reform ergriffen wurden. Eine Ausnahme machte hier nur die Gründung des Instituts für Softwaretechnologie, das aus der Abteilung für Datenverarbeitung hervorging, die sich seit 1968 auf eigene Initiative mit der Entwicklung des Time-Sharing-Betriebssystems B.I.T.S (Bonn Interaktive Terminal System) befaßt hatte und nun vor allem mit Siemens als dem größten deutschen Computerhersteller zusammenarbeiten sollte (Interview XVII).

Auf der Suche nach der großen und großforschungsspezifischen Aufgabe der Gesellschaft führte das Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft (BMBW) als Nachfolgeorganisation des BMWF, das seinerseits 1972 durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) abgelöst wurde, 1970 eine Befragung der führenden Computerhersteller und Softwarehäuser über deren Vorstellungen zu den künftigen Forschungsschwerpunkten der GMD durch. Aber auch diese Umfrage blieb ergebnislos und führte zu keiner einheitlichen programmatischen Perspektive. Die befragten Unternehmen vertraten weit auseinanderlaufende und zum Teil diametral entgegengesetzte Auffassungen über den künftigen Kurs der GMD (Wiegand 1994: 158).

Die Ratlosigkeit des Bonner Forschungsministeriums über die künftigen Aufgaben der Gesellschaft hatte dann zur Folge, daß der Bundesrechnungshof 1972 die Initiative mit dem Ziel übernahm, die GMD für ein Großforschungsprojekt für die öffentliche Hand heranzuziehen. Seit dem Ende der sechziger Jahre plante die Bundesregierung den Aufbau einer »Bundesdatenbank« beziehungsweise eines »Informationsbankensystems«, mit dem sie hoffte, die Arbeit der öffentlichen Verwaltungen umfassend rationalisieren und automatisieren zu können. Die Bundesdatenbank sollte auf ein »national integriertes Informationssystem« (Lutterbeck 1975) hinauslaufen, das aus einem hierarchisch gegliederten und zentral verwalteten Verbundnetz von vielen hundert öffentlichen und privaten Datenbanken bestand, die den Benutzern die Möglichkeit boten, in kürzester Zeit Informationen aus prinzipiell beliebigen Verwaltungsbereichen abzurufen und auszutauschen.

Die Federführung für dieses überaus ambitionierte Projekt lag beim Bundesinnenministerium (BMI), das bereits 1968 eine »Koordinations- und Beratungsstelle der Bundesregierung für die elektronische Datenverarbeitung in der Bundesverwaltung« eingerichtet hatte, die ressortübergreifende Kompetenzen bei der Einführung der EDV in der öffentlichen Verwaltung besaß. Sein Beginn hatte sich jedoch aus vielerlei Gründen immer wieder verzögert, bis sich 1972 der Bundesrechnungshof in die Forschungspolitik des Bundes einschaltete. Dessen Prüfer waren 1971 zu einem vernichtenden Ergebnis über die Verwendung der Fördermittel für die GMD gelangt und beanstandeten vor allem, daß der überwiegende Teil dieser Mittel in die mathematische Grundlagenforschung floss, ohne daß deren »Bezug zur Anwendung der DV hinreichend sichtbar geworden wäre« (Wiegand 1994: 177). Die GMD, so das Urteil der Prüfer, unterscheide sich nicht wesentlich von einem Universitätsinstitut und verfehle ihren Auftrag als Forschungseinrichtung des Bundes grundlegend. Um diesen Mangel abzustellen, empfahl

der Bundesrechnungshof, daß die GMD entweder in erster Linie für den Aufbau der geplanten Bundesdatenbank herangezogen oder geschlossen werden sollte.

Mit dieser unmißverständlichen Stellungnahme des Bundesrechnungshofs erübrigte sich das ursprüngliche Vorhaben des BMI, für die Entwicklung der Bundesdatenbank eine eigene Abteilung für Datenverarbeitung einzurichten. Nach dem katastrophalen Urteil der Rechnungsprüfer blieb dem BMFT wenig anderes übrig, als der Forderung nach einer umfassenden Beteiligung der GMD an der Entwicklung der Bundesdatenbank nachzukommen. Gegen den Widerstand des Forschungsministeriums erhielt der Bundesinnenminister jetzt auch weitgehende Mitzeichnungsrechte im BMFT und Weisungsbefugnisse gegenüber der GMD, die damit im Verlauf der siebziger Jahre in großem Umfang als Softwarehaus für die öffentliche Hand fungierte (Interview XIII)

Allerdings entwickelte sich das Projekt Bundesdatenbank auch zum ersten großen softwaretechnischen Fehlschlag der GMD. Aus der geplanten »Großforschung für die öffentliche Hand« ging eine Fülle von unzusammenhängenden Klein- und Kleinstprojekten hervor, die mit dem ursprünglichen Ziel, ein »national integriertes Informationssystem« zu schaffen, nicht mehr viel gemein hatte. Für die Verwirklichung dieses Ziels waren weder die technischen noch die organisatorischen Bedingungen gegeben. Die Bundesdatenbank war eine Vision von Politikern und zu dem Zeitpunkt, als das Projekt in Angriff genommen wurde,

gab es in den obersten Bundesbehörden offensichtlich noch keine Vorstellung darüber, welche umfangreichen und schwierigen informationswissenschaftlichen Voraussetzungen erst geschaffen werden müssen, um einen solchen Informationsverbund realistisch planen zu können. (Lutterbeck 1978: 89)

Das Projekt scheiterte, und der Begriff Bundesdatenbank versandete im Verlauf der siebziger Jahre allmählich. Was von dem ambitionierten Vorhaben des Bundes letztlich blieb, war die Entwicklung von speziellen Informationssystemen wie des juristischen Informationssystems JURIS oder Programmen für die Verarbeitung von Massendaten in mehr als fünfzig Einzelprojekten der GMD (Interview X).

Aber auch die Mitarbeiter der GMD setzten sich nicht sonderlich für die Aufgaben ein, für die sie im Rahmen des Bundesdatenbankprojekts herangezogen wurden. Die eher handwerklichen Aufgaben, die es bei seiner Tätigkeit für die Behörden des Bundes und der Länder zu erfüllen hatte, waren nicht dazu geeignet, ein Personal zu motivieren, das für den Aufbau eines

der weltweit größten informationstechnischen Forschungszentren rekrutiert worden war und ein entsprechendes professionelles Selbstverständnis besaß (Interview XXVII). Da sich mit diesen Tätigkeiten weder innerhalb noch außerhalb der GMD Reputation erwerben ließ, kamen die Arbeiten auch nur schleppend voran.²¹⁴

Als Folge des Zugzwangs, unter den das BMFT durch den Bericht des Bundesrechnungshofs geraten war, setzte dann 1973 auch die Umstrukturierung der GMD mit dem Ziel ein, den Stellenwert der Mathematik in der Gesellschaft zurückzudrängen und ihre Arbeit stärker an der angewandten Forschung und Softwareentwicklung auszurichten. Dazu wurden zunächst die Institute für Mathematik, Angewandte Mathematik und Numerische Datenverarbeitung zu einem personell erheblich reduzierten Institut für Mathematik zusammengefaßt und die Abteilung für behördliche Datenverarbeitung zum Institut für Informationssysteme aufgewertet. Aus dieser Abteilung ging dann ebenfalls das Institut für Datenverarbeitung im Rechtswesen hervor, während das BMFT einen Teil des aufgelösten Instituts für Numerische Datenverarbeitung in das Institut für Graphische Datenverarbeitung und Strukturerkennung überführte. All diese Einrichtungen arbeiteten im Verlauf der siebziger Jahre hauptsächlich für Behörden des Bundes und der Länder. Dagegen sollte das ebenfalls 1974 gegründete und stark sozialwissenschaftlich orientierte Institut für Planungs- und Entscheidungssysteme weniger für unmittelbare Dienstleistungen als zur Unterstützung der mittel- und langfristigen politischen Planung herangezogen werden.²¹⁵

Als eine Einrichtung, die sich jetzt neben dem Institut für Softwaretechnologie primär am Bedarf der Wirtschaft ausrichten und mit der Industrie kooperieren sollte, wurde das zuvor stark mathematisch ausgerichtete Institut für Theorie der Automaten und Schaltnetzwerke unter einer neuen Leitung in das technisch orientierte Institut für Rechner- und Programmstrukturen überführt. Im Zuge seiner Reformmaßnahmen gliederte das BMFT angesichts der sich gerade vollziehenden »Hochzeit« der elektronischen Datenverarbeitung und Telekommunikation jetzt auch das DRZ in Darmstadt, das aufgrund seiner technischen Ausrichtung zunächst nicht für den Aufbau

214 Neben den technischen und motivationalen Problemen trug zum Scheitern der Bundesdatenbank aber auch die ablehnende Haltung der Fachressorts bei, die als Folge einer solchen Datenbank Einschränkungen in ihren Kompetenzen und ein Anwachsen der Macht des Bundeskanzleramts befürchteten (vgl. dazu ausführlich: Schatz 1973).

215 Die Motive, die zur Gründung und zum Forschungsprogramm des GMD-Instituts für Planungs- und Entscheidungssysteme führten, sind ausführlich dokumentiert in: Hoschka/Kalbhen (1975).

der GMD in Frage gekommen war, als Institut für Datenfernverarbeitung in die Gesellschaft ein. Während sich diese Institute mit der Entwicklung und dem Bau konkreter Softwaresysteme befassen sollten, fiel dem neu eingerichteten Institut für Informationssystemforschung unter der Leitung von C.A. Petri die Aufgabe zu, die Grundlagen der Informationstechnik zu erforschen und formale Modelle und Methoden der Programmierung bereitzustellen.

Außerdem sahen die Pläne des BMFT vor, die Finanzierung der GMD auf ein »Unternehmensmodell« umzustellen. Dieses Vorhaben orientierte sich an der gerade eingeleiteten Strukturreform der FhG, deren öffentliche Grundfinanzierung seit 1973 von dem finanziellen Auftragsvolumen abhängt, das sie durch die Vertragsforschung selbst erwirtschaftet. Mit diesem »Unternehmensmodell« von Forschungsorganisation schuf das BMFT einen finanziellen Anreiz, die Forschungsaktivitäten der FhG am Bedarf der Wirtschaft zu orientieren, verzichtete auf eine unmittelbare Steuerung ihrer Institute und überließ die Evaluation ihrer Arbeit dem Markt (Hohn/Schimank 1990: Kap. 6).

Der Plan des BMFT, das Modell der erfolgsabhängigen Grundfinanzierung auch auf die GMD zu übertragen, stieß jedoch sowohl auf den Widerstand des Landes NRW wie des Bundeswirtschaftsministeriums. Die Landesregierung hatte sich bereits für die Erhaltung der mathematischen Grundlagenforschung in der GMD eingesetzt und sah in dem Unternehmensmodell die Gefahr, daß die Gesellschaft jetzt vollends zu einer reinen Dienstleistungsorganisation degradiert wurde. Zudem werde der Forschungspolitik die Steuerung der Gesellschaft mit einem solchen Finanzierungsmodell entzogen und auf Dritte und eine unübersehbare Zahl von Financiers verlagert. Das Wirtschaftsministerium machte dagegen geltend, daß das Unternehmensmodell zu Wettbewerbsverzerrungen führe. Die GMD dürfe nicht in Konkurrenz zu den Softwarehäusern treten, sondern müsse im vorwettbewerblichen Raum und im Vorfeld der Software-Industrie arbeiten.

Obwohl das BMFT trotz dieser Einwände programmatisch an dem Unternehmensmodell festhielt, hat es dieses Modell im Fall der GMD jedoch faktisch nie umgesetzt. Das Bonner Forschungsministerium forderte die Institute zwar dazu auf, Drittmittel einzuwerben und verankerte diese Forderung auch in einem neuen Gesellschaftsvertrag. Als das Modell dann 1974 offiziell in Kraft trat, wirkten sich die eingeworbenen Mittel aber anders als bei der FhG in einer Kürzung der Institutsetats in gleicher Höhe aus. Statt einen Anreiz für die Akquisition von Forschungsaufträgen zu schaffen, stellte das BMFT deren Einwerbung also praktisch unter Strafe und versperrte der GMD damit den Entwicklungspfad, den die FhG nach 1973 einschlug.

7.3.2 Zersplitterte Projekte und Transferprobleme

Zudem war mit den Reformmaßnahmen des BMFT Mitte der siebziger Jahre alles andere als eine großforschungsspezifische Ausrichtung der GMD entstanden. Die Gesellschaft zerfiel jetzt in eine Vielzahl von unzusammenhängenden und zumeist sehr kleinen Projekten, aus denen keine integrativen Leitbilder für ihre Arbeit hervorgingen. Soweit es die primär serviceorientierten Institute anging, und deren Kapazitäten nicht ohnehin von dem später gescheiterten Projekt Bundesdatenbank absorbiert wurden, unterschied sich deren Arbeit in nichts von dem, was auch von privaten Softwarehäusern oder durch die Vergabe von Forschungsaufträgen hätte erledigt werden können.

Dies wird etwa an den Arbeiten des Instituts für Graphische Datenverarbeitung und Strukturerkennung deutlich, dessen Projekte durchaus beispielhaft für die Aufgaben der serviceorientierten GMD-Einrichtungen insgesamt standen. Für die Bundesanstalt für Straßenwesen entwickelte das Institut Mitte der siebziger Jahre ein Programm zur Berechnung der Struktur von Straßenkurven, für den Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk ein rechnergestütztes Informationssystem zur Flächennutzungsplanung, für das BMFT ein graphisches Ausgabesystem für dessen Datenbank »Forschungsvorhaben« und für das Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung ein statistisches Programm zur Auswertung von Massendaten der Gesetzlichen Krankenversicherungen. Dies alles waren kurzfristige und wissenschaftlich wenig anspruchsvolle Projekte ähnlich wie etwa Schulis (Schulinernes Informationssystem), ein Programm für die DV gestützte Stundenplanung an Schulen, das aus dem Institut für Informationssysteme hervorging.

Auch für die Entwicklung des juristischen und noch anspruchsvollsten Datenbanksystems der GMD, JURIS, durch das Institut für Datenverarbeitung im Rechtswesen hätte es keiner Großforschungseinrichtung bedurft. Die einzig kritische und wissenschaftlichen Sachverstand erfordernde Aufgabe bei der Entwicklung dieses Systems bestand in der Entscheidung über die logische Grundstruktur der Datenbank. Nach dieser Entscheidung fielen lediglich noch Routineaufgaben an, die ebenso gut an einen externen Auftragnehmer hätten vergeben werden können, wo die Weiterentwicklung und Wartung des Systems heute auch liegt (Interview X). Dennoch band die Entwicklung des Informationssystems die gesamte Kapazität des Instituts, während es ihm zugleich untersagt war, sich mit Grundlagenfragen der Rechtsinformatik auseinanderzusetzen.²¹⁶

216 Dieses Verbot ging unter anderem darauf zurück, daß es das BMFT ablehnte, »Binde-

Mit den Aufgaben des Instituts für Planungs- und Entscheidungssysteme verhielt es sich nicht viel anders. Das Institut sollte mit der Hilfe von mikroanalytischen Simulationsmodellen die Auswirkungen von Gesetzen und Gesetzesänderungen untersuchen. An die Arbeit des Instituts knüpften sich anfänglich große Erwartungen, da die Relevanz solcher Simulationsmodelle für die sozioökonomische Planung in der Phase der sozialdemokratischen Reformpolitik als sehr hoch eingeschätzt wurde. Ihre prognostische Kraft erwies sich jedoch als wesentlich geringer als erwartet, während zugleich das Interesse der Politik an der Arbeit des Instituts rasch nachließ. Das einzige Produkt des Instituts, das schließlich den Weg in die politische Praxis fand, war ein Simulationssystem für das Bundesausbildungsförderungsgesetz (Bafög), das sicher auch als Auftragsarbeit eines kommerziellen oder halbkommerziellen Softwareherstellers hätte entstehen können (Interview XVI).

Aber auch, was die Entwicklung von Softwareprodukten für die Industrie und die Zusammenarbeit der Institute mit der privaten Wirtschaft anging, blieb die GMD weit hinter den Erwartungen zurück. Hier richteten sich insbesondere große Hoffnungen auf das Institut für Softwaretechnologie, von dem das BMFT annahm, daß sich speziell Siemens für das dort entwickelte Betriebssystem B.I.T.S. interessieren würde. B.I.T.S. war das Produkt einer Gruppe von »Idealisten« (Interview VII), die mit diesem System demonstrieren wollten, daß auch komplexe Programme hoch stabil sein konnten, wenn sie mit den Mitteln der Strukturierten Programmierung entwickelt worden waren. Es zählte zu den weltweit ersten parallelen Betriebssystemen überhaupt und lief bereits mit hoher Zuverlässigkeit auf der IBM 360–50 der GMD als die IBM selbst außer Testversionen noch kein Time-Sharing-System für diese Maschine anbot und auch BS-2000, das Betriebssystem der Rechner von Siemens, noch nicht über die Möglichkeit zur parallelen Datenverarbeitung verfügte. Doch obwohl BS-2000 auch in anderer Hinsicht viele Mängel aufwies und keineswegs zu den robustesten Systemen zählte, die damals am Markt waren, entwickelte sich keine enge Kooperation zwischen Siemens und dem Institut für Softwaretechnologie.

Siemens hatte BS-2000 in seiner Grundversion im Rahmen eines Joint-ventures von dem amerikanischen Computerhersteller RCA übernommen (Interview XXVII), der sich kurze Zeit später aus diesem Markt zurückzog.

strich-Informatiken« in der GMD zu betreiben. In diesem Fall, so die Begründung, hätte im Prinzip jede beliebige spezielle Informatik einen Anspruch darauf anmelden können, in der Gesellschaft vertreten zu sein, und die Gefahr einer Aufspaltung ihrer Forschungsaktivitäten in verschiedene informatische Teildisziplinen bestanden (Interview XIII).

Seit dieser Zeit hatte das Haus viele tausend Personen-Jahre in die Weiterentwicklung und Wartung von BS-2000 investiert und war nicht bereit, diese Investitionen mit der Einführung eines neuen Systems abzuschreiben (Interview XI). Siemens übernahm von B.I.T.S. lediglich die Protokollsoftware für die parallele Datenverarbeitung und entwickelte BS-2000 damit zu einem Time-Sharing-System weiter, das vom Institut für Softwaretechnologie ausführlich getestet wurde. Mit diesen Tests beschränkte sich die Zusammenarbeit des Instituts mit Siemens auf Verbesserungen von BS-2000, weitete sich aber nicht zu einer langfristigen Kooperation aus (Interview XVII). BS-2000 blieb bis weit in die achtziger Jahre der proprietäre Standard des Hauses Siemens und wurde erst durch das Lock-in von UNIX abgelöst.

Neben dem mißlungenen Transfer von B.I.T.S. und der nicht zustande gekommenen Kooperation mit Siemens scheiterte mit der Programmiersprache Pearl (Process Experiment Automation Realtime Language) auch ein zweites Projekt des Instituts für Softwaretechnologie. Pearl war eine formale Hochsprache, die speziell für die Programmierung von parallelen Prozessen und Realzeitsystemen entwickelt worden war. Die ersten Entwürfe dieser Sprache gingen Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre aus einer Arbeitsgruppe am Kernforschungszentrum Karlsruhe hervor. Mit der finanziellen Unterstützung des BMFT implementierten dann Mitte der siebziger Jahre mehrere industrielle Anwender und Hochschulinstitute diese Sprache auf ihren Rechnern, um erste Erfahrungen mit Pearl zu sammeln und Verbesserungsvorschläge zu formulieren.

Diese zunächst lose gekoppelte Arbeitsgemeinschaft von Pearl-Anwendern ging 1976 in ein Verbundprojekt des BMFT über, das auf rund dreißig Teilnehmerorganisationen aus der Industrie und Wissenschaft anwuchs und in dem der GMD beziehungsweise dem Institut für Softwaretechnologie die Aufgabe zukam, die Sprache zu standardisieren und eine formale Beschreibung ihrer Syntax und Semantik mit Hilfe der Petri-Netze zu entwickeln. Ziel des Verbundprojekts war es, durch eine normierte Version, NormPearl, eine Standardsprache für Realzeitsysteme zu schaffen. Der 1979 durch den Verein Deutscher Ingenieure (VDI) gegründete Pearl-Verein, dem dann 1983 rund einhundert Mitglieder angehörten, sollte die Verbreitung dieser Programmiersprache fördern und über die Einhaltung der Norm wachen. Daneben sollte Pearl als künftiger Standard der Bundeswehr fungieren.

Das Vorhaben, eine normierte Version von Pearl zu entwickeln, erwies sich jedoch wesentlich schwieriger als erwartet. Jeder Teilnehmer an dem Verbundprojekt implementierte eine andere Version von Pearl und hatte jeweils eigene Vorstellungen über den Umfang und die Features von Norm-

Pearl. Zudem entwickelte sich insbesondere ein Konflikt zwischen Vertretern des Maschinenbaus, die einen eher pragmatischen Ansatz verfolgten, und der Informatik, die ein »hemdsärmeliges« Vorgehen (Interview XXXIII) ablehnten und eine saubere formale Definition von Pearl anstrebten. Dies hatte zur Folge, daß sich die Definition von NormPearl in die Länge zog und Ende der siebziger Jahre immer noch kein Konsens über die endgültige Definition der Sprache bestand. Auch ihre formale Verifikation bereitete große Probleme und erwies sich als sehr viel schwieriger als erwartet. »Die formale Beschreibung war nicht Stand der Kunst.«²¹⁷

Der Streit um die Definition von NormPearl legte sich erst als diesem deutschen Sprachentwurf durch die Entwicklung von Ada in den Vereinigten Staaten Anfang der achtziger Jahre eine ernsthafte Konkurrenz entstand. Nachdem der Sprachentwurf Ende der siebziger Jahre mehrmals revidiert worden war, gelang es angesichts der Gefahr, die Pearl durch Ada drohte, 1980 einen Standard zu fixieren, der noch im selben Jahr auch ein Zertifikat des Deutschen Instituts für Normung (DIN) erhielt und parallel dazu bei der International Standards Organisation (ISO) eingereicht wurde. Damit hatte das Erscheinen von Ada nun zwar die Einigung auf eine Norm bewirkt, zugleich aber zur Folge, daß das Interesse der Industrie und der Hochschulen an Pearl abrupt nachließ.

Obwohl die Entwicklung von Ada noch nicht so weit gediehen war, wie die von Pearl, und die amerikanische Entwicklung in den Augen vieler Experten qualitativ nicht an den deutschen Entwurf heranreichte (Interview XXIII; Interview XXIX), bildete sich jetzt allgemein die Erwartung heraus, daß sich diese Sprache angesichts des immensen Aufwands, mit dem das DoD sein Produkt zu verbreiten suchte, als internationaler Standard etablieren werde. So beklagte der Koordinator des Verbundprojekts, daß Pearl als der »fortschrittlichste Kandidat« (Martin 1977: 6) unter den Echtzeitsprachen gerade im Begriff war, auf breiter Basis genutzt zu werden, aber genau »in dieser Situation erscheint Ada auf dem Plan. ... Ada, mit ungeheurem Propagandaaufwand verbreitet, erscheint als die Supersprache der Zukunft. ... Man sagt: »Dann warten wir doch lieber noch auf Ada.«²¹⁸

Besiegelt wurde dann der Niedergang von Pearl durch die Verweigerung eines ISO-Standards. Während Ada im Jahr 1984 eine Norm der ISO erhielt (Iburg 1991: 213), erteilte die internationale Standardisierungsorganisation dem deutschen Sprachentwurf in der entscheidenden Abstimmung im selben

217 Projektträgerschaft Fertigungstechnik, Aktennotiz für das BMFT/424 v. 14.4.1981, S. 2.

218 Projektträgerschaft Fertigungstechnik, Aktennotiz für das BMFT/424 v. 14.4.1981, S. 3.

Jahr kein entsprechendes Zertifikat. In den Augen der Beteiligten auf der deutschen Seite war diese Entscheidung rein wirtschaftspolitisch motiviert. Im Ausschuß der ISO, so ein deutsches Komiteemitglied, versagten vor allem europäische Länder wie Frankreich und Großbritannien, die selbst über kein vergleichbares nationales Produkt auf dem Gebiet der Programmiersprachen verfügten oder bei dessen Entwicklung noch zurücklagen, Pearl ihre Unterstützung, um zu verhindern, daß die Bundesrepublik wirtschaftliche Vorteile aus einer potentiellen Standardsprache ziehen konnte. Angesichts des unterschiedlichen Entwicklungsstands der europäischen Entwürfe sei es einfacher gewesen, sich auf Ada als einen Standard zu einigen, der allen europäischen Ländern die gleichen Startbedingungen bot (Interview XXXIII). Die Entwicklungskosten von Pearl, die das BMFT in den Jahren 1972 bis 1981 mit rund 37 Millionen DM bezuschulte,²¹⁹ gingen damit weitgehend verloren. Die Programmiersprache wird heute mit abnehmender Tendenz lediglich noch von wenigen industriellen Anwendern in der Bundesrepublik eingesetzt und an den Hochschulen nur mehr zu Lehrzwecken benutzt (Interview XXIII). Auch die Bundeswehr hat ihre Absicht aufgegeben, Pearl als Standard zu etablieren, und setzt sie neben Ada ein, während in den vergangenen Jahren zugleich auch C immer stärker in den Bereich der militärischen Programmierung vorgezogen ist (Interview XXIX).

Ein ähnliches Schicksal wie Pearl erlitt auch das GMD-Netz als eine Entwicklung des Instituts für Datenfernverarbeitung. Dieses Netz war ein Prototyp für die paketvermittelte Datenfernverarbeitung, die sich um die siebziger Jahre als effizientere Alternative zur leitungsvermittelten Datenübertragung etablierte.²²⁰ Das Design dieses Netzes lehnte sich eng an das ARPANET an, das in den USA bereits in den sechziger Jahren im Rahmen des militärischen Projekts Multiple Access Computer (MAC) entstanden war und für den Datentransport das sogenannte »virtual channel switching« benutzte, bei dem keine direkte physikalische Verbindung zwischen dem Sender und Empfänger mehr bestand, sondern die Wahl der Übermittlungskanäle durch das Netzwerk selbst während des Transports der Daten erfolgte. Diese Technik war vom amerikanischen Militär ursprünglich mit dem Ziel entwickelt worden, die Übermittlung von Daten auch dann noch zu gewährleisten, wenn Teile des Telefonnetzes durch Kriegseinwirkungen zerstört waren. Als Nebeneffekt bot sie jedoch auch den Vorteil, daß sich die

219 Projektträgerschaft Fertigungstechnik, Aktennotiz für das BMFT/424 v. 14.4.1981, S. 1.

220 Die folgenden Angaben beruhen auf einem ausführlichen Gespräch mit dem Leiter des Instituts (Interview XXXI).

Leitungskapazitäten eines Telefonnetzes sehr viel effizienter nutzen ließen. Ein gravierender Nachteil des »virtual channel switching« bestand allerdings darin, daß gleichsam Verkehrsprobleme bei der Übermittlung von Datenpaketen auftreten konnten, die zu spontanen Zusammenbrüchen des Netzes führten.

So zeigten die Erfahrungen mit dem ARPANET in den USA, daß sich dieses Netz unter Hochlastbedingungen instabil verhielt und seine Leistung auf bis zu zehn Prozent des möglichen Durchsatzes absank. Angesichts dieser Probleme des ARPA-Netzes hatte die Entwicklung des GMD-Netzes zum Ziel, mit Hilfe neuartiger Kontrollstrukturen den Datenfluß so zu optimieren, daß es sich auch unter Hoch- und Überlastbedingungen stabil verhielt. Dieses Entwicklungsziel war um so klarer vorgezeichnet, als das GMD-Netz später als öffentliche Infrastruktur bereitgestellt und von der Deutschen Bundespost als nationaler Standard übernommen werden sollte. Technisch wurde es auch weitgehend erreicht. Das GMD-Netz zählt zu den weltweit stabilsten und zuverlässigsten Telekommunikationsnetzen überhaupt. Seine Übernahme durch die Bundespost und seine Implementation als nationale Norm scheiterte aber am X.25-Standard, den die internationale Standardisierungsorganisation Consultative Committee for Telephone and Telegraph (CCITT) im Jahr 1976 verabschiedete.

X.25 war ein technisch ausgesprochen schwacher Standard von minderer Qualität, der in einer Art Überraschungscoup von einer Gruppe von Vertretern nationaler Organisationen im Bereich der Telekommunikation wie der französischen, der kanadischen, der britischen und der US-amerikanischen PTTs im CCITT auf informellem Weg durchgesetzt wurde, die jeweils bereits in eine bestimmte Norm investiert beziehungsweise sich verbindlich auf sie festgelegt hatten. Schon in den frühen sechziger Jahren hatte sich das CCITT mit der Frage befaßt, »what generell characteristics should be standardized to permit international data communication over public data networks« (Sirbu/Zwimpfer 1985: 38), aber keine konsensfähige Norm entwickelt. Auch als am Beginn der siebziger Jahre längst eine Vielzahl von paketvermittelten privaten und öffentlichen Netzwerken wie das ARPANET in den USA in Betrieb waren, wurde eine solche Norm innerhalb des CCITT immer noch kontrovers diskutiert, und erst als weitere Länder ankündigten, solche Netzwerke einzurichten, entstand genügend Handlungsdruck, um die Mitglieder der Organisation zur Suche nach einer konsensfähigen Lösung zu bewegen.

Die Fixierung eines internationalen Standards für die Paketvermittlung drohte in den formellen Verhandlungen des CCITT 1976 jedoch abermals an

der Vielzahl konkurrierender Designvorschläge und ungeklärter technischer Fragen zu scheitern. Zugleich aber war es von entscheidender Bedeutung, noch im selben Jahr zu einer Einigung zu gelangen, da das entsprechende Komitee des CCITT satzungsgemäß erst vier Jahre später wieder zusammentreffen würde. Da abzusehen war, daß sich angesichts der rasch wachsenden Vernetzung der Computersysteme im Jahr 1980 jeweils feste nationale Standards etabliert haben würden, wäre bei diesem nächsten Treffen ein Konsens über eine gemeinsame Norm noch schwerer zu erzielen gewesen. In dieser Situation arbeiteten die Vertreter der Länder, die sich bereits auf eine bestimmte Norm festgelegt hatten, in separaten informellen Verhandlungen und unter hohem Zeitdruck einen Kompromißvorschlag aus, der zahlreiche technische Ungereimtheiten und offene Fragen enthielt, aber schließlich vom Komitee des CCITT nach der Maßgabe verabschiedet wurde, daß ein schwacher Standard besser als kein Standard war.

Everyone knew that such a loose specification would create problems when attempts were made to interconnect different networks in the future, but all were prepared to pay this price in the interests of getting the agreed portions of X.25 accepted. (Sirbu/Zwimpfer 1985: 40)

Mit X.25 war das GMD-Netz »locked out« und sein Transfer gescheitert. Es wurde zwar in einer zu X.25 kompatiblen Version noch innerhalb der Gesellschaft installiert, kam aber als nationaler Standard der Bundespost nicht mehr in Frage. Das Institut für Datenfernverarbeitung zog aus diesem Rückschlag die Lehre, daß sich autonome nationale Lösungen angesichts des wachsenden internationalen Koordinationsbedarfs in der Telekommunikation überlebt hatten, und verzichtete künftig weitgehend auf die Entwicklung eigener Produkte, um sich mit seinen Forschungsergebnissen statt dessen im Bereich der Normung zu engagieren (Interview XXXI). Es beteiligte sich später mit einem großen Teil seiner Kapazitäten im CCITT und insbesondere in der International Standards Organization (ISO) an der Entwicklung von X.400 und OSI als Normen, die X.25 ablösen sollten. Zunächst sah es auch tatsächlich so aus, als werde sich X.400 als der Standard in der Telekommunikation etablieren. X.400 galt noch bis vor kurzem als eines der wenigen geglückten Projekte der Komiteestandardisierung in der Informationstechnik (Goos 1994). Aber auch dieser kooperativ-korporative Versuch, eine technische Norm zu definieren, nahm viel zu viel Zeit in Anspruch und ist heute weitgehend an dem »boom« gescheitert, den das Internet als »Netz der Netze« in der Mitte der neunziger Jahre plötzlich erlebte. Das Internet basiert seinerseits auf dem alten ARPANET des DoD, das sich damit jetzt trotz all

seiner gravierenden Mängel endgültig als internationale Norm durchgesetzt hat (Salus 1995).

Einen weiteren Rückschlag erlebte die GMD dann am Beginn der achtziger Jahre auch mit dem Betriebssystem Eumel und der Programmiersprache Elan. Eumel und Elan waren aus einer Forschungsk Kooperation der Gesellschaft mit der Universität Bielefeld hervorgegangen und mit dem Ziel entwickelt worden, möglichst ergonomische und zugleich hoch stabile Systeme für die neue Generation der Arbeitsplatzrechner und Persönlichen Computer zu schaffen. Elan war eine strukturierte Sprache, die auf Pascal basierte, aber zumindest ansatzweise ein umgangssprachliches Programmieren ermöglichte, und Eumel ein sich weitgehend selbst erklärendes, leicht zu portierendes und robustes Betriebssystem, das gewissermaßen »aus einem Guß« (GMD-Spiegel 1, 1985: 32) bestand und in der informatischen Fachwelt ob seiner architektonischen Prinzipien und sauberen Ausführung große Anerkennung fand (Interview XXV; vgl. auch Winkelhage 1988).

Diese beiden Produkte der GMD hatten jedoch nie eine Chance, sich gegen C und UNIX durchzusetzen, die sich am Beginn der achtziger Jahre als die Standards der Workstations etablierten. Die Leitung der Gesellschaft unternahm zwar große Anstrengungen, um für die Verbreitung der beiden Systeme zu sorgen, und zeitweise bestand dort sogar die Hoffnung, daß das japanische Ministry for International Trade and Industry (MITI) sie als Standard einführen werde (GMD-Spiegel 3/4, 1985: 42–43), aber diese Hoffnung dürfte eher vom Wunsch des Vorstands, endlich ein gelungenes Transferprojekt vorweisen zu können, als von einer realen Chance motiviert worden sein (Interview XLIII; Interview XXVII). Auch Hochschulen wie die Universität Bielefeld, deren Rechenzentrum zunächst ganz auf Elan und Eumel setzte, stellten ihre Maschinen im Verlauf der achtziger Jahre auf UNIX und C um. Die beiden Systeme der GMD sind heute ausgestorben.²²¹

Dieses Schicksal teilte schließlich auch der sogenannte Einheitsbausteinrechner (EBR), mit dessen Entwicklung das Institut für Rechner- und Programmstrukturen der GMD im Jahr 1976 begann. Das Institut nahm »Untersuchungen zur Strukturierung von Zentralprozessoren unter dem Gesichtspunkt einer Vereinheitlichung der Bausteine« vor, die zu »vereinfachten Strukturen von Zentralprozessoren führen und damit zu einer Verringe-

221 Als Reaktion auf UNIX hat die GMD am Beginn der achtziger Jahre dann noch mit BIRLIX (von Birlinghoven, dem Sitz der Gesellschaft) eine eigene Variante dieses Betriebssystems entwickelt (GMD-Jahresbericht 1985: 34–45). Benutzt hat auch dieses System außerhalb der GMD freilich niemand (Interview XXVII).

«rung der Entwicklungszeiten und Kosten» (GMD Jahresbericht 1979: 25). Neue logische architektonische Prinzipien sollten es erübrigen, für den Bau von Rechnern unterschiedliche Hardwarekomponenten für verschiedene Funktionen wie Steuern, Rechnen und Speichern entwickeln zu müssen. Rechner wie der EBR sollten mit nur noch drei Typen von Leiterplatten auskommen, die als Massenprodukte hergestellt werden konnten und auf diesem Weg die Hardwarekosten deutlich senkten. Angesichts der potentiellen Einspareffekte, die der EBR ermöglichte, bewertete ein externes Gutachten das Vorhaben noch 1976 als »überragend bedeutsam« (Wiegand 1994: 225), und auch die industrielle Beteiligung an dem Projekt schien gesichert. Wenngleich es Siemens abgelehnt hatte, mit der GMD bei der Entwicklung des EBR zu kooperieren, so signalisierte doch der Computerhersteller Nixdorf anfänglich großes Interesse an der Arbeit des Instituts für Rechner- und Programmstrukturen (Interview XXXII). Dennoch scheiterte auch das EBR-Projekt.

Die mit diesem Projekt eingeschlagene Strategie zur Rationalisierung der Rechnerfertigung war nur so lange sinnvoll, wie die Maschinen noch diskret aufgebaut waren. Mit den enormen Fortschritten der Mikroelektronik und der Entwicklung der hochintegrierten Schaltkreise am Ende der siebziger Jahre aber wurden die Leiterplatten als Kostenfaktor für den Bau von Rechnern praktisch bedeutungslos. Damit hatte sich das EBR-Projekt bereits wenige Jahre nach seinem Beginn überlebt. Nixdorf zog sich 1979 aus dem Projekt zurück, das dann 1981 ergebnislos eingestellt wurde (Interview XXXII). Mit diesem Projekt war die vom BMFT angestrebte Zusammenarbeit der GMD mit der Industrie nun auf der ganzen Linie gescheitert. »In den Jahren bis 1982 kam in keinem Fall eine längerfristig angelegte Forschungsk Kooperation zustande, weder mit Siemens noch einer anderen Firma« (Wiegand 1994: 259).

Während die technisch orientierten Institute der GMD mit ihren Transferprojekten scheiterten, führten die Arbeiten des Instituts für Informationssystemforschung von Carl Adam Petri immer tiefer in die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der formalen Programmiermethoden und Verifikationsverfahren. Die Erwartung, daß die Petri-Netze zu einem methodischen Durchbruch in der Programmierung führen würden, erfüllte sich nicht. Wie die algebraischen Methoden erwies sich auch Petris Ansatz als ein zu schwaches Instrument für die Lösung der wachsenden Komplexitätsprobleme in der Programmierung. Dies zeigte sich unter anderem bereits bei der formalen Beschreibung der Programmiersprache Pearl mit Hilfe der Petri-Netze. Die formale Sprachbeschreibung von Pearl wurde derart komplex

und unüberschaubar, daß sich der Aufwand letztlich nicht lohnte (Interview XXXIII).

Petri und seine Mitarbeiter wandten sich angesichts der Defizite der vorhandenen formalen Methoden in den späten siebziger und achtziger Jahren von den praktischen Problemen der Programmierung ab und zunehmend der Grundlagenforschung zu. Petri selbst arbeitete an der Entwicklung einer Theorie der Informationsbilanzierung, die ihn allerdings in bis heute und auf absehbare Zukunft ungelöste grundlagentheoretische Fragen führte (Interview XXVIII). Mit seinem Rückzug in die Grundlagenforschung unterschied sich die Arbeit des Instituts für Informationssystemforschung letztlich in nichts von einem Hochschulinstitut und hätte ebensogut oder besser an einem akademischen Lehrstuhl betrieben werden können. Der grundlagentheoretischen Forschung war Petris Verortung in der GMD eher abträglich. Petri und seine Mitarbeiter sahen sich ständig mit der Forderung nach Anwendungen der Netztheorie konfrontiert und wurden ständig in anwendungsorientierte Projekte involviert, obwohl sie dazu kaum einen Beitrag leisten konnten (Interview XXVIII).

Zugleich trug die Ansiedlung des Instituts in der GMD aber auch erheblich dazu bei, daß sich unter deren Mitarbeitern eine professionelle Grundhaltung verfestigte, die sich in hohem Maße an theoretischen Prinzipien und formalen mathematischen Standards, statt pragmatisch an befriedigenden Lösungen für die softwaretechnische Praxis orientierte. Mit dem Institut für Informationssystemforschung besaß die formalistische Schule großen Einfluß auf das ingenieurwissenschaftliche Selbstverständnis vieler Mitarbeiter der GMD und hat dort eine stark akademische Sichtweise der Softwareentwicklung geprägt, die mit den eher handwerklichen Aufgaben, für die die Gesellschaft etwa im Rahmen des Bundesdatenbankprojekts herangezogen wurde, in Konflikt stand (Interview XXVII; Interview V).

7.4 Kurskorrektur im Kurswechsel – neuer Reformversuch, die japanische Herausforderung und gescheiterte Großprojekte

Angesichts ihrer Zersplitterung in viele unzusammenhängende und gescheiterte Einzelprojekte kam es dann am Ende der siebziger Jahre erneut zu dem Versuch, die Gesellschaft zu reformieren und auf eine gemeinsame große Aufgabe hin zu orientieren. Die in der ersten Hälfte der siebziger Jahre als

Folge seiner ergebnislosen Suche nach der »großen Aufgabe« eingeleitete Diversifizierung der GMD in weitgehend voneinander unabhängige Institute mit unverbundenen Projekten wurde jetzt als ursächlich dafür angesehen, daß die GMD kein übergreifendes Forschungsprogramm entwickelt hatte. In den Augen des BMFT hatten die Institute zuviel Eigengewicht entwickelt und ein sich ausbreitender »Institutsegoismus« die Koordination der Projekte und die Konzentration der Mittel auf einige wenige Forschungsschwerpunkte verhindert. Statt einer Großforschungseinrichtung, so die Kritik des Bonner Forschungsministeriums, gleiche die GMD einem »Gemischtwarenladen« mit verselbständigten Untereinheiten, in dem sich keine synergetischen Effekte herausbilden könnten (Interview XLI).

Diese Kritik des BMFT löste am Ende der siebziger Jahre zunächst eine etwa zweijährige Planungsdiskussion innerhalb der GMD selbst aus, in der sich die Institutsleiter intensiv darum bemühten, ein langfristiges Forschungsprogramm für die Gesellschaft zu erarbeiten, das einen grundlegenden Neubeginn ermöglichen sollte. Selbst unzufrieden mit der Situation der GMD versuchten die Direktoren, eine Bilanz aus ihren bisherigen Projekten zu ziehen und sich auf gemeinsame Forschungsschwerpunkte zu einigen. Aber auch der Versuch, die »große Aufgabe« in horizontaler Selbstkoordination zu definieren, scheiterte und führte nicht zu konkreten Ergebnissen. Das von den Institutsleitern vorgeschlagene Programm wies lediglich thematisch verwandte Projekte der GMD unter gemeinsamen Arbeitstiteln aus und war im Empfinden eines der beteiligten Direktoren letztlich »das Papier nicht wert, auf dem wir unsere Vorschläge gemacht haben« (Interview XXXI).

Das BMFT beendete diese Diskussion dann 1980 mit der zweiten großen Strukturreform der GMD, mit der es einen neuen und mit weitgehenden Vollmachten ausgestatteten Vorstand einsetzte. Das Forschungsprogramm der GMD sollte nun von diesem Vorstand aufgestellt und koordiniert und vom Aufsichtsrat der Gesellschaft als Ganzes genehmigt werden. Hatte das BMFT mit der ersten Strukturreform das Ruder selbst in die Hand genommen, so delegierte es mit der zweiten Refom die Definition der »großen Aufgabe« der GMD jetzt an die Leitung der Gesellschaft selbst. Es folgte darin auch einer Empfehlung des wissenschaftlichen Beirats, der sich hierdurch eine Straffung der organisatorischen Struktur und Bündelung der Forschungsaktivitäten der GMD versprach. Zugleich führte das BMFT das Konzept der Verbundforschung als verbindliches Prinzip der Forschungsorganisation der GMD ein. Demzufolge sollten größere Projekte nur noch unter der Beteiligung von privaten Unternehmen durchgeführt werden, um zu gewährleisten, daß sie sich am Bedarf der Industrie ausrichteten.

Dem 1981 neu eingesetzten Vorstand schwebte eine Matrixorganisation der GMD ähnlich wie am Kernforschungszentrum Karlsruhe vor, mit der er die einzelnen Forschungseinheiten der Gesellschaft an einer institutsübergreifenden Programmstruktur auszurichten und sie in eine klar aufeinander bezogene Aufgabenordnung zu bringen suchte. Dazu reduzierte er die zehn Institute und Abteilungen der GMD mit den Instituten für Methodische Grundlagen, für Systemtechnik, für angewandte Informationstechnik, für Informationstechnische Infrastrukturen und für Technologie-Transfer auf nunmehr fünf Einrichtungen, für die er ein sogenanntes »Schichtenmodell« entwickelte. In diesem Modell bildete das Institut für Methodische Grundlagen sozusagen die oberste Schicht, während dem Institut für Technologie-Transfer am unteren Ende die Aufgabe zugedacht war, die von der Grundlagenforschung sukzessive zur Anwendungsreife entwickelten Produkte der GMD zu vermarkten. Diese »Schichten« sollten zugleich auch die Programmschwerpunkte der GMD »Systemwissen«, »Softwaretechnologie«, »Bürokommunikation«, »alternative Verwaltungssysteme« sowie »Simulations- und Planungsmodelle« repräsentieren.

Diese mit großem Aufwand durchgesetzte Strukturreform führte aber weder zu einer engeren Verzahnung der Grundlagen- und Anwendungsforschung noch zu einer Verringerung der Anzahl der Projekte und der Konzentration der Mittel auf einige wenige Schwerpunkte. Wie der neue Vorstand später eingestand, erwies sich das Schichtenmodell schon sehr bald als nicht tragfähig und diente letztlich nur der Darstellung der GMD nach außen. Es lief auf eine lediglich vordergründige Ordnung hinaus, hinter der sich eine nach wie vor heterogene und schwach koordinierte Organisationsstruktur der Gesellschaft verbarg. Die methodische Grundlagenforschung der GMD verfügte über keine Produkte, die sie in einen seriellen Transferprozeß hätte einschleusen können, und die angewandte Forschung der Gesellschaft zerfiel auch in den achtziger Jahren in eine Vielfalt unverbundener Einzelprojekte, deren Zahl zudem unvermindert anstieg.

So wies das Forschungs- und Entwicklungsprogramm der GMD 1985 mehr als hundert Einzelvorhaben aus (GMD-Forschungs- und Entwicklungsprogramm 1985). Auch die Reduktion der Institute und Abteilungen auf fünf Einrichtungen hatte nur formal zu größeren Forschungseinheiten geführt. Die Institute teilten sich ebenfalls bereits 1985 auf vierundzwanzig verschiedene Forschungsbereiche auf, die auf unterschiedlichen Gebieten und mit unterschiedlichen theoretischen und methodischen Ansätzen arbeiteten. Damit entsprach die Gesellschaft auch in den achtziger Jahren einem

von kontingenten politischen Entscheidungen geprägten heterogenen Konglomerat unterschiedlicher Forschungseinheiten.²²²

Zugleich wurde der neue Vorstand noch während der Strukturreform durch die plötzliche Renaissance der KI-Forschung in Form der Expertensystemtechnik am Beginn der achtziger Jahre überrascht. Die Renaissance dieses Forschungszweiges kam völlig unerwartet und wurde innerhalb der Gesellschaft zunächst mit breiter Skepsis aufgenommen. Wie in der deutschen Informatik generell hatte die KI-Forschung auch in der GMD nie eine große Rolle gespielt. Innerhalb des Fachs galt sie als ein eher unseriöses und abgeschlossenes Kapitel in der Entwicklung der Computer science und traf auch bei der überwiegenden Mehrheit der Wissenschaftler in der GMD auf Ablehnung. Mit dem »Fifth Generation Programme« der japanischen Regierung und dem einsetzenden internationalen Wettlauf um die technologische Führungsrolle auf diesem Gebiet wurde die KI-Forschung aber nun gleichsam über Nacht zu einem der größten Forschungsschwerpunkte der GMD.

Auf Drängen und mit Unterstützung des BMFT reagierte der Vorstand der Gesellschaft auf das Programm der japanischen Regierung noch während der Strukturreform der GMD mit einem erneuten Kurswechsel. In der Forschungspolitik des Bundes wirkte sich das »Fifth Generation Programme« wie ein großer Paukenschlag aus und mobilisierte dort in erheblichem Umfang neue Fördermittel für die GMD, mit denen die Gesellschaft zum größten deutschen und drittgrößten europäischen Forschungszentrum in der KI-Forschung ausgebaut wurde. Mit der Wissensverarbeitung schien eine neue, revolutionäre Technologie entstanden zu sein, die nach einem organisatorischen Rahmen, wie sie die GMD als Großforschungseinrichtung bot, verlangte, und mit der nun auch endlich die »große Aufgabe« der Gesellschaft gefunden zu sein schien. In der GMD sollten in einem ersten Schritt die theoretischen Grundlagen von wissensbasierten KI-Systemen erforscht und spezielle Programmierumgebungen und Werkzeuge für die Entwicklung von Expertensystemen entwickelt werden. Im Anschluß daran sollten dann in Zusammenarbeit mit industriellen Anwendern Prototypen von wissensverarbeitenden Systemen entstehen und als komplette, anwendungsfähige Expertensysteme durch die kommerziellen Partner der GMD vermarktet werden.

222 Dies zeigte sich auch nicht zuletzt am Beschluß des neuen und der Betriebswirtschaft eng verbundenen Vorstands, eine Forschungsstelle für Wirtschafts- und Betriebsinformatik einzurichten, deren Arbeit von den übrigen Aktivitäten der Gesellschaft vollkommen isoliert blieb (Interview XLII).

Tatsächlich konnte sich die Gesellschaft in nur wenigen Jahren innerhalb der KI-Forschung großes Renommee erwerben. Es gelang ihr, die namhaftesten deutschen Wissenschaftler in der KI-Forschung zu gewinnen und diesen Forschungszweig zügig auszubauen. Die GMD war auf allen internationalen KI-Konferenzen führend vertreten und wurde rasch Teil der weltweiten »KI-Gemeinde«. Auch was die Kooperation mit der Wirtschaft und den Transfer von Produkten der GMD in die Industrie anging, schien die Entscheidung, der KI-Forschung und dem »knowledge engineering« in der Gesellschaft breiten Raum zu geben, zunächst von Erfolg gekrönt zu sein. Grund für diese Hoffnung gab vor allem das Softwareentwicklungswerkzeug »Babylon«, das 1983/84 in prototypischer Form am Institut für Angewandte Informationstechnik der GMD entstand. Dieses Werkzeug vereinte unterschiedliche methodische Ansätze in der Programmierung und erlaubte es, algorithmische, logische und objektorientierte Darstellungsweisen für die Wissensrepräsentation miteinander zu kombinieren. Wissenschaftlich kam Babylon zwar eine eher geringe Bedeutung zu, aber es war eines der ersten Entwicklungstools, die in der Expertensystemtechnik verfügbar waren, und stieß in der Industrie auf großes Interesse.

Um 1985 entstanden dann mit Vorhaben wie WEREX, TEX-B oder TEX-I mehrere große Verbundprojekte auf dem Gebiet der Expertensystemtechnik, an denen sich unter anderen Firmen wie Bayer, Krupp Atlas, Triumph Adler, Siemens, ADV/ORGA, Danet, PCS, BMW, Ford und VW sowie eine Vielzahl von Hochschuleinrichtungen beteiligten und mit denen Babylon im Zuge der Konstruktion konkreter Expertensysteme zu einem anwendungsreifen Werkzeug weiterentwickelt werden sollte. Damit schien das Werkzeug »breit etabliert« (Interview V) zu sein und die GMD vor ihrem ersten großen Transfererfolg zu stehen. Tatsächlich aber setzte nur kurze Zeit später eine Phase der »permanenten Krisen« (Interview VIII) in den Verbundprojekten ein. Wie in der symbolischen KI-Forschung allgemein, stellte sich auch in den Projekten der GMD rasch heraus, daß die Erwartungen an die Expertensystemtechnik bei weitem überzogen waren und die Wissensverarbeitung keine »killer technology« darstellte. Statt zu einer umfassenden Rationalisierung der Programmierung zu führen, erforderte die Entwicklung der Systeme in erster Linie handwerkliche Arbeit und eine intensive Auseinandersetzung mit speziellem und fallbezogenem Wissen. »In der ersten Phase des Technology-Pushs, da waren alle begeistert, aber dann kamen ganz andere Forderungen, nämlich die konkreten Requirements der Benutzer« (Interview V).

In den Augen eines der Projektleiter wäre es jetzt entscheidend auf die Bereitschaft seiner Mitarbeiter angekommen, mit den beteiligten Unternehmen zu kooperieren und softwaretechnische Detailarbeit zu leisten, um die Vorhaben doch noch zum Erfolg zu führen. Dazu aber waren die Mitarbeiter nicht motiviert. Die Anforderungen, die die Entwicklung konkreter Produkte stellten, kollidierten mit ihren wissenschaftlichen Interessen. Diese galten den grundlagentheoretischen Fragen der KI-Forschung, in der sich mit Systementwicklungen zudem keine Reputation erwerben ließ. So stellten sich denn auch sehr bald Konflikte zwischen den Projektgruppen der GMD und der Industrie ein, die bemängelte, daß es die Informatiker der GMD an der notwendigen Verlässlichkeit in der konkreten Projektarbeit mangeln ließen und nicht dazu bereit seien, Mitverantwortung für den Erfolg der Kooperationsvorhaben zu tragen (Interview XXXVIII). Während die Industrie ihre Erwartungen an die Expertensystemtechnik sehr rasch reduzierte, sich pragmatisch auf das Ziel beschränkte, die Systeme lauffähig zu machen, und den KI-Forschern der GMD vorwarf, »akademischen Träumen« (Interview XXXVIII) nachzuhängen, kritisierten die Mitarbeiter der GMD wiederum die unwissenschaftliche Vorgehensweise der Industrie. Diese Konflikte hatten zur Folge, daß die Projekte am Ende der achtziger Jahre gewissermaßen in sich zusammenfielen und weitgehend ergebnislos blieben. Aus den Verbundprojekten der GMD ging kein einsatzfähiges Expertensystem hervor.²²³

Das Entwicklungswerkzeug Babylon fand später dann noch den Weg in die Industrie. Nach einem im Jahr 1987 gescheiterten Versuch eines leitenden Mitarbeiters der GMD, sich mit Babylon selbständig zu machen und das Werkzeug über die Firma Infovation zu vertreiben (Interview V), meldete das Softwarehaus VW-GEDAS 1988 Interesse an diesem Produkt an und übernahm Babylon 1990 von der GMD (vgl. dazu auch Ahrweiler 1995a: 131). Der Transfer von Babylon nahm insgesamt sechsdreißig Mann-Jahre in Anspruch, die etwa zu gleichen Teilen von VW-GEDAS und der GMD gestellt wurden. Aber auch dieser Transferprozeß vollzog sich nur äußerst zähflüssig. Die Mitarbeiter der GMD mußten vom Vorstand geradezu »abkommandiert« (Interview XVI; Interview XXXVI) werden und kamen auch in den Augen ihrer industriellen Partner ihrem Kooperationsauftrag nur widerstrebend nach (Interview III).

223 Als das noch erfolgreichste Projekt, das aus der KI-Forschung der GMD hervorging, gilt in der GMD das Expertensystem DEX.C3, ein Programm zur Fehlerdiagnose in einem automatischen Getriebe des Automobilherstellers Ford, das allerdings ebenfalls nicht bis zur Anwendungsreife gelangte und von Ford nicht eingesetzt wird Coy/Bonsiepen (1989: 87).

Während die symbolische KI-Forschung breiten Raum in der GMD einnahm, hat die Gesellschaft die Fuzzy logic dagegen nicht aufgegriffen. Der Versuch, die GMD für die Fuzzy logic zu gewinnen, beschränkte sich auf eine interne Seminarreihe eines einzelnen wissenschaftlichen Mitarbeiters der Gesellschaft, in der er für dieses Forschungsthema warb, aber nicht auf Resonanz stieß (Interview VII). Die Fuzzy logic wird in der Bundesrepublik im wesentlichen an der RWTH Aachen erforscht, der es mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen und dessen sogenannter Fuzzy-Initiative NRW mittlerweile gelang, eine internationale Spitzenposition auf diesem Gebiet einzunehmen (Interview XLV), und mit der insbesondere kleinere und mittlere Unternehmen des Landes an die Fuzzy logic herangeführt werden sollen.

Neben der KI-Forschung nahm die GMD als Folge des vom »Fifth Generation Programme« ausgelösten internationalen Wettbewerbs 1982 ein weiteres großes Projekt in Angriff, das dann am Ende der achtziger Jahre ebenfalls scheiterte. Bei diesem Projekt handelte es sich um den massiv parallelen Großrechner Suprenum (von Numerischer Supercomputer), mit dem man glaubte, neben der Expertensystemtechnik eine weitere große und großforschungsspezifische Aufgabe der GMD gefunden zu haben. Die Entwicklung von Suprenum, der, wie es im BMFT hieß, einmal zum »Brüter der GMD« avancieren sollte (Interview XXIV), wurde vom Bund mit rund einhundert Millionen DM gefördert und war das mit Abstand größte Einzelprojekt der Gesellschaft.

Mit diesem massiv parallelen Rechner sollte ein »neues Kapitel« (GMD-Spiegel 1/1989: 10) in der Geschichte des Computers aufgeschlagen und ein Quantensprung im Hinblick auf die Arbeitsgeschwindigkeit der Maschinen vollzogen werden (vgl. auch Wiegand 1994: 301–306). Alle bisherigen parallelen Systeme wie die Vektorrechner waren sogenannte SIMD-Maschinen (Single Instruction Multiple Data), deren Prozessoren zwar verschiedene Daten, aber alle exakt nach dem selben Programm berechneten. Suprenum wurde dagegen als MIMD-Rechner (Multiple Instruction Multiple Data) ausgelegt, bei dem hunderte von Prozessoren mit jeweils eigenem Speicher unabhängig voneinander verschiedene Programme ausführen und deren Ergebnisse untereinander austauschen. Dieses Prinzip erlaubte insbesondere im Fall von numerischen Berechnungen enorme Leistungssteigerungen, auf die die Industrie »sehnsüchtig« (GMD-Spiegel 1/1989: 10) zu warten schien. Die Grenzen der herkömmlichen Maschinen lagen bis dahin bei numerischen Gleichungssystemen mit einigen hunderttausend Unbekannten, während mit massiven Parallelrechnern die Berechnung mehrerer Millionen

Gleichungen, wie sie etwa die dreidimensionale Darstellung einer Fahrzeugsilhouette oder die Simulation von Turbulenzen in der Strömungsmechanik erfordert, möglich wurde.

Entwickelt wurde Suprenum im Rahmen eines Verbundprojekts, an dem sich insgesamt dreizehn Organisationen aus dem Bereich der Großforschung, der Hochschulen und der Industrie beteiligten. Der wichtigste industrielle Kooperationspartner der GMD war die Krupp Atlas Elektronik GmbH, die auch die Hardware des Rechners fertigte und mit der die Gesellschaft 1986 die Suprenum GmbH gründete, die später seinen kommerziellen Vertrieb übernehmen sollte. Siemens als der zunächst favorisierte Partner der GMD hatte eine Beteiligung an der Entwicklung von Suprenum abgelehnt. Das Unternehmen bot in den achtziger Jahren eine Reihe von Vektormaschinen an, deren Leistungsgrenzen ihm noch nicht erreicht schienen und die es für ausbaufähig hielt (Interview XI).

Aus einer rein wissenschaftlichen Perspektive war das Projekt zur Entwicklung von Suprenum erfolgreich. Die von der GMD in Kooperation mit einer Reihe von informatischen und mathematischen Hochschulinstituten entwickelte hoch komplizierte numerische Software zur Koordination der Kommunikationsprozesse zwischen den Rechnerknoten machte die Maschine zu einem exzellenten Produkt, das in der internationalen Fachwelt große Anerkennung fand (Interview XXV; Interview XXI). Wirtschaftlich wurde es jedoch ein Mißerfolg. Bereits während der Entwicklungsarbeiten an der Maschine meldeten leitende Mitarbeiter der GMD Zweifel an den kommerziellen Erfolgsaussichten von Suprenum an und verließen das Projekt (Interview XXVII). Kurze Zeit nachdem der Rechner dann 1989 der Suprenum GmbH übergeben worden war, kündigte Krupp Atlas den Gesellschaftsvertrag und zog sich aus der Kooperation mit der GMD zurück.

Für massiv parallele Systeme gab es am Ende der achtziger Jahre keinen aufnahmefähigen Markt. Suprenum war den Vektormaschinen noch keineswegs überlegen, und dieser Maschinentyp ist auch heute noch nicht konzeptionell veraltet. Die Rechenleistungen der Vektormaschinen stiegen kontinuierlich an und zogen Ende der achtziger Jahre mit der von Suprenum durchaus gleich. Da es für diese Rechner auch bereits eine umfangreiche Grundsoftware gab, die für Suprenum erst geschaffen werden mußte, bot das Produkt der GMD den Anwendern keinen Vorteil. Darüber hinaus traten um 1985 private Firmen mit den sogenannten »Transputern« auf den Markt, die mit ihren parallelen Architekturen zu geringeren Kosten vergleichbare Rechenleistungen wie Suprenum boten (Interview XLV). Damit scheiterte auch der Transfer dieses Produkts. Suprenum blieb ein Unikat und ging

nicht in Serie. Als sich dann Mitte der neunziger Jahre die Industrie für massiv parallele Architekturen zu interessieren begann, war die Hardware des GMD-Rechners, die bereits zum Zeitpunkt seiner Fertigstellung nicht mehr als zukunftsweisend gelten konnte, hoffnungslos veraltet. Möglicherweise wird aber die numerische Software, die in der GMD für die Koordination der Rechnerkonten von Suprenum entwickelt wurde, in Zukunft eine Rolle für das logische Design von Transputern spielen. IBM Deutschland zeigte sich Mitte der neunziger Jahre an einer entsprechenden Kooperation mit der GMD interessiert, deren Ergebnisse derzeit jedoch noch ausstehen (Interview XVIII).

Angesichts der enttäuschenden Erfahrungen mit Suprenum und den Verbundprojekten in der KI-Forschung leitete der mittlerweile neu besetzte Vorstand Ende der achtziger, Anfang der neunziger Jahre dann abermals eine Reform der Gesellschaft ein, mit der er nun allerdings ihre zuvor angestrebte Ausrichtung an der Industrie revidierte und das Ziel verfolgte, der Grundlagenforschung in der GMD einen größeren Spielraum zu verschaffen. So stellte der neue Vorstand jetzt fest, der rasche technische Wandel in der Informationstechnik führe

bei manchen Beobachtern zu der irrigen Meinung ..., daß in der Informatik überwiegend anwendungsbezogen geforscht würde. Richtig daran ist nur, daß bei der Auswahl der Themenstellungen der Grundlagenforschung selbstverständlich die aus der Anwendung am dringlichsten erscheinenden Lücken Vorrang erhalten. Hieraus resultiert auch die jedem Informatiker bekannte Situation, daß der Fundus an Ergebnissen zur Grundlagenforschung bei weitem nicht ausreicht, um eine wissenschaftliche Erklärung selbst elementarer Phänomene zu ermöglichen, geschweige denn, die vom Ingenieur-Informatiker konstruierten Artefakte so zu gestalten, daß ihre Eigenschaften im technischen und sozialen Umfeld präzise vorherzusagen sind. (GMD-Jahresbericht 1988: 8)

Er zog hieraus den Schluß: Die GMD »beschränkt sich auf wenige solcher Anwendungen und führt an diesen exemplarisch vor, wie die Weiterentwicklung der wissenschaftlichen Methodik der Informatik nutzbringend eingesetzt werden kann« und strebt »eine konsequente interne Orientierung für die wissenschaftliche Arbeit« an (ebd.: 8–9).

Die erste Reformmaßnahme bestand darin, das Institut für Technologietransfer zu schließen, während die KI-Forschung der GMD im Zuge der Neuorientierung der Gesellschaft auf die Grundlagenforschung Ende der achtziger Jahre in dem Projekt »Assistenz-Computer« mündete. Dieses Projekt ist auf fünfzehn Jahre angelegt, hat keinen konkreten Entwicklungsauftrag und verfolgt explizit eine »Vision« (ebd.: 9). Es soll zur »Entwick-

lung einer völlig neuen Generation informationstechnischer Bürosysteme« (ebd.: 9) führen und hat nur vage definierte Ziele, die sich mit der »Metapher des Assistenten« (Mambery/Pateau/Tepper 1995) verbinden. Die neuen Systeme »sollen sich in der Art, wie sie ihre Leistungen erbringen, an den Fähigkeiten und Leistungen orientieren, die einen guten Assistenten auszeichnen«, »ungenauere Anweisungen verarbeiten können« und sich »an einen Auftraggeber anpassen und von ihm lernen« (ebd.: 14). Ob und wie weit diese Metapher für die Entwicklung konkreter Informationssysteme tragfähig ist, läßt sich derzeit noch nicht absehen.

Unklar ist auch, welchen Kurs die GMD in Zukunft steuert. Im Jahr 1992 erhielt die Gesellschaft abermals einen neuen Vorstand, der ihre grundlagentheoretische Ausrichtung partiell wieder zurücknahm und sie wieder stärker auf die angewandte Informationstechnik zu orientieren suchte. Das Ergebnis dieser revidierten Revision ist offen. Fest steht nur, daß sich auch in den neunziger Jahren die Suche nach der großen und großforschungsspezifischen Aufgabe der GMD fortsetzte, während zugleich immer wieder neue Themen, wie die Simulation biologischer Prozesse in Zellkernen, virtuelles Studio, multimedialer Computer oder das Internet, das Forschungsprogramm der Gesellschaft bestimmten.²²⁴ Auch in den neunziger Jahren hat die GMD zu keiner stabilen Aufgabe und Identität gefunden, und es ist nicht zu sehen, wo diese identitätsstiftende Aufgabe auf einem Feld wie der Informatik liegen sollte.

7.5 Kontextsteuerung als Alternative – der Erfolgskurs der FhG

Während die GMD von Beginn an einen weitgehend erfolglosen Schlingerkurs nahm, hat die FhG mit dem Modell der anreizfinanzierten Vertragsforschung in der Informationstechnik einen stabilen Wachstumspfad eingeschlagen, ohne daß es dazu einer hierarchischen Koordination ihrer Institute und deren Aufgaben bedurft hätte. Mehr noch als die GMD präsentiert sich die FhG als ein heterogenes Konglomerat unterschiedlicher Institute mit fragmentierten Forschungsgebieten und unverbundenen Projekten, bei dem

224 Vgl. dazu die laufende Berichterstattung über die Projekte der Gesellschaft im GMD-Spiegel 1990–1996.

sich aber die Frage nach der großen, integrativen Aufgabe der Organisation erst gar nicht stellt.

Die FhG bezieht ihre organisatorische Identität aus dem Ziel, einen möglichst hohen Anteil an Vertragsforschung zu erwirtschaften, und muß sie nicht über kollektive Aufgaben erzeugen. Die FhG-Institute fungieren explizit als autonome Profitcenters, deren Leitungen für die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Resultate der Einrichtungen selbst verantwortlich sind. Sie erhalten eine öffentliche Grundfinanzierung, die von der Höhe der von ihnen selbst eingeworbenen Mittel abhängig ist, jährlich mit der Zentrale neu verhandelt wird und je nach den Marktbedingungen und dem Bedarf an Eigenforschung etwa zwischen zwanzig und vierzig Prozent an den Haushalten der Institute ausmacht.

Anders als das Modell der Großforschung ist das Prinzip der anreizfinanzierten Vertragsforschung nicht am forschungspolitischen Reißbrett entstanden und sein institutionelles Design keine »creatio ex nihilo«, als die es später häufig dargestellt wurde. Die FhG hat dieses Modell vielmehr im Verlauf der sechziger Jahren sozusagen aus der Not heraus in einer forschungspolitischen Phase entwickelt, in der die Gesellschaft noch keine institutionelle Förderung des Bundes erhielt und um ihr Überleben kämpfte. In diesem Überlebenskampf bildete sich die FhG-interne Praxis heraus, Forschungsgelder aus öffentlichen und privaten Aufträgen zur Finanzierung einer sogenannten Vorhalte- oder Eigenforschung unter den Instituten umzuverteilen, um sie wiederum in die Lage zu versetzen, neue Aufträge zu akquirieren.

Im Zuge ihrer Aufnahme in die institutionelle Forschungsförderung des Bundes und der Reform der Gesellschaft in den frühen siebziger Jahren ist dann dieses Prinzip durch das BMFT konzeptionell zum Modell der variablen Grund- und Anreizförderung ausgebaut und als eine Form der Forschungsförderung entdeckt worden, die ihm ein Instrument zur Effizienzkontrolle der Gesellschaft an die Hand gab. Der Erfolg dieses Modells hat alle Erwartungen übertroffen und zu einem bis heute ungebrochenen »boom« in der Auftragsforschung der FhG geführt (vgl. zur Entwicklung der FhG ausführlich: Hohn/Schimank 1990: 171–231).

Die Gesellschaft hat seit der Einführung des Modells der variablen Grundfinanzierung eine organisatorische Kultur entwickelt, deren Wertstruktur denkbar einfach ist und die in dem Indikator »Rho« ihre zentrale Orientierungsgröße besitzt. »Rho« bezeichnet das prozentuale Verhältnis der Grund- und Eigenfinanzierung eines jeden Instituts und wird vierteljährlich auf der Institutsleiterkonferenz der FhG bekannt gegeben. Auf dieser Konferenz

werden auch die Ursachen für ein eventuelles Abweichen von den Planungsvorgaben öffentlich diskutiert. Innerhalb der Gesellschaft genießen wiederum diejenigen Institute das größte Prestige, die neben einem besonders hohen absoluten Volumen an Auftragsforschung auch ein besonders großes »Rho« (d.h. niedrigen Anteil an öffentlicher Grundförderung) aufweisen.²²⁵

Diese institutionelle Struktur macht die FhG zu einem Adressatenmodell von Forschungsorganisation, das den Typus des Entrepreneur-Wissenschaftlers attrahiert und kultiviert. Obwohl es sich zunächst hauptsächlich im Bereich konventioneller Technologien entwickelt hat, bewährt sich dieses Modell auch und gerade in der Informationstechnik, wo es in besonderem Maße auf die orientierende Funktion der Nutzer und die Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern der Artefakte ankommt.

Die FhG unterhielt im Bereich der Informationstechnik 1990 insgesamt neun Institute. Im einzelnen waren dies die FhI für:

- Informations- und Datenverarbeitung, IITB²²⁶,
- Arbeitswirtschaft und Organisation, IAO,
- Produktions- und Konstruktionsanlagen, IPK,
- Physikalische Meßtechnik, IPM,
- Festkörpertechnologie, IFT,
- Produktionstechnik und Automatisierung, IPA,
- Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, IMS,
- Integrierte Schaltungen, IIS,
- Graphische Datenverarbeitung, IGD.²²⁷

Als Folge des Vorrangs, den die Förderung der GMD in den DV-Programmen der Bundesregierung besaß, kam der Informationstechnik und Informatik in der FhG zunächst keine hohe Bedeutung zu (Interview XIII). In den siebziger Jahren beschränkten sich die Aktivitäten der Gesellschaft auf diesem Gebiet im wesentlichen noch auf das IITB. In den achtziger Jahren sind dann jedoch auch die Fraunhofer-Institute IPA, IPK und IAO immer stärker in den Bereich der Informations- und Softwaretechnik vorgedrungen, die

225 Einer der Institutsdirektoren brachte dies im Gespräch auf den Punkt, daß es in der FhG zwei Arten von Geld gibt, »gutes Geld«, das aus privaten Quellen fließt, und »schlechtes Geld«, das aus den öffentlichen Haushalten stammt (Interview XXXIX).

226 Dieses Institut trug bis 1979 die Bezeichnung Institut für Informationsverarbeitung in Technik und Biologie. Das davon abgeleitete Kürzel IITB wurde sozusagen als Markenzeichen des Instituts beibehalten.

227 Ausgenommen sind hier die verteidigungsbezogenen Institute der FhG in der Informationstechnik.

heute den bei weitem größten Anteil ihres Auftragsvolumens ausmacht, oder haben wie das IPM ihr ursprüngliches Arbeitsgebiet verlassen und sich dieser Technik zugewandt beziehungsweise wie das IFT zunehmend programmiertechnische Aufgaben übernommen. Das IPA zählt zu den renommiertesten Einrichtung der FhG und gehört der Gesellschaft bereits seit den frühen sechziger Jahren an. Es arbeitet ähnlich wie das in der Mitte der siebziger Jahre entstandene IPK in der industriellen Regelungs-, Fertigungs- und Automatisierungstechnik. Aus ihm ging 1980 auch das IAO hervor, das sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung von Büro- und Kommunikationssystemen befaßt. Alle drei Institute sind heute in der Hauptsache softwaretechnologische Institute.

Eine grundlegende Umorientierung auf die Informationstechnik vollzog in den achtziger Jahren das IPM, das bis 1979 ausschließlich im Auftrag des BMFT in der Weltraumforschung tätig war und sich heute in der industriellen Meß- und Verfahrenstechnik mit dem Entwurf von kundenspezifischen Schaltungen und CAD-Systemen befaßt. In diese Richtung hat sich auch die Arbeit des IFM entwickelt. Als eine zunächst rein festkörperphysikalische Einrichtung, die sich in den siebziger Jahren noch ausschließlich mit der Physik der Schaltelemente befaßte, hat das Institut im Zuge der achtziger Jahre zunehmend auch softwaretechnische Aufgaben übernommen und seine Aktivitäten auf diesem Gebiet sukzessive erweitert.

Zu diesen sechs Instituten traten erst um die Mitte der achtziger Jahre mit dem IMS, dem IIS und dem IGD drei neue Einrichtungen der FhG auf dem Gebiet der Informationstechnik hinzu. Diese Einrichtungen entstanden zunächst als befristete Arbeitsgruppen und gingen dann in reguläre Institute der Gesellschaft über. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des IMS und IIS erstrecken sich über ein breites Spektrum von anwendungsspezifischen Schaltungen und Softwaresystemen in der Prozeß-, Leit- und Steuerungstechnik, die von der Kraftfahrzeugelektronik bis zu medizinischen Applikationen reichen.

Das 1987 in Freiburg gegründete IGD arbeitet auf dem Gebiet der graphischen Modellierung und konstruktiven Geometrie an der Entwicklung von CAD-Systemen. Wie auch im Fall anderer Einrichtungen der FhG ist seine Bezeichnung aber bereits heute veraltet, da die Aktivitäten des Instituts rasch über sein ursprüngliches Arbeitsgebiet hinausgingen. Die Tätigkeiten des IGD beschränkten sich schon kurze Zeit nach seinem Entstehen nicht mehr nur auf die graphische Datenverarbeitung, sondern weiteten sich auf multimediale Systeme und visuelle, akustische und taktile Schnittstellen für die Mensch-Maschine-Kommunikation aus. Wie das IMS und IIS hat

auch das IGD einen stabilen Wachstumspfad in der Auftragsforschung einschlagen können und besitzt in der Industrie bereits heute hohes Ansehen.

Mit diesen neun Instituten hat sich die FhG faktisch zur größten deutschen Forschungseinrichtung auf dem Gebiet der Informationstechnik und Informatik entwickelt.²²⁸

Die informationstechnischen Institute der FhG sind in den achtziger Jahren kontinuierlich gewachsen. Mit rund 200 Millionen DM übertrafen die Einnahmen dieser Institute den Haushalt der GMD im Jahr 1990 um etwa 20 Millionen DM, während der Anteil ihrer öffentlichen Grundförderung im Verlauf des vergangenen Jahrzehnts von durchschnittlich ca. 33 auf 25 Prozent absank. Das forschungsorganisatorische Modell der Kontextsteuerung bewährt sich damit auch und gerade auf dem komplexen und sich rasch wandelnden Feld der Informationstechnik, zumal es hier auch für die erforderliche enge Koppelung zwischen den Produzenten und Anwendern der Systeme sorgt.

Dies wird vor allem im Vergleich der informatischen Großforschung mit der Entwicklung und Arbeitsweise des IITB deutlich, das etwa gleichzeitig zur ersten Strukturreform und der geplanten, dann aber nicht vollzogenen Einführung des »Unternehmensmodells« für die Finanzierung der GMD entstand. Dieses Institut ging seinerseits Mitte der siebziger Jahre aus der Reform und Umstellung der FhG auf die Anreizfinanzierung hervor und trat die Nachfolge des FhI für Schwingungsforschung an, das bis dahin in der physikalischen Meßtechnik für das Bundesverteidigungsministerium tätig war. Die wachsenden Möglichkeiten in der industriellen Produktion, feinmechanische Bauelemente durch Softwaresysteme ersetzen zu können, führten das Institut im Zuge seines Auf- und Ausbaus zu einer informationstechnischen Einrichtung in die Fertigungstechnik und dort auf das Gebiet der optischen und akustischen Mustererkennung und Prozeß-Datenverarbeitung, wo es sehr rasch reüssierte.

Das IITB verfügte 1975 über einen Etat von etwa 5 Millionen DM, der, wie dies zunächst für alle Fh-Institute Mitte der siebziger Jahre noch vorgesehen war (vgl. Hohn/Schimank 1990: Kap. 6), zur Hälfte durch das BMFT grundfinanziert wurde, während sich die restlichen Mittel zu 40 Prozent aus öffentlichen Aufträgen und zu 10 Prozent aus der industriellen Vertragsfor-

228 Zum Teil ist es allerdings schwierig, die Quellen des Haushaltsvolumens dieser Institute exakt zu bestimmen, da ihre Arbeit oft über das Gebiet der Informationstechnik hinausreicht. Allerdings spiegelt sich darin auch wider, daß die Grenzen der Informationstechnik unscharf, ständig im Fluß sind und sich nicht fest abstecken lassen.

Tabelle 1 *Finanzhaushalte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung sowie der informationstechnischen Institute der Fraunhofer-Gesellschaft 1980 bis 1990, in Mio. DM*

	GMD	IITB	IAO	IPK	IPM	IFT	IPA	IMS	IIS	IGD	Summe FhI	GMD %	FhI %
1980	55,4	17,2	3,2	9,9	5,5	10,1	14,6	-	-	-	60,5	100,0	100,0
1981	64,4	19,2	6,5	11,1	6,6	15,7	14,1	-	-	-	73,2	116,2	121,0
1982	64,5	19,2	8,7	10,3	6,6	12,4	16,2	-	-	-	73,4	116,4	121,0
1983	63,9	22,2	9,2	11,7	7,2	16,8	16,2	-	-	-	83,3	115,3	137,7
1984	70,2	22,1	11,0	13,9	8,1	11,9	21,1	0,9	-	-	88,1	126,7	145,6
1985	89,5	24,6	11,1	15,8	9,8	12,8	23,4	6,8	-	-	104,3	161,5	172,4
1986	119,5	27,5	14,7	19,7	11,1	12,9	26,6	6,4	10,7	-	129,6	215,7	214,2
1987	128,7	27,9	17,0	19,2	14,5	12,9	30,3	17,5	13,4	4,4	157,1	232,3	259,7
1988	160,6	28,2	19,0	26,7	12,9	16,5	35,5	14,4	18,9	7,3	179,4	289,1	296,5
1989	167,2	29,2	17,7	26,5	13,4	18,2	40,6	11,8	24,6	10,1	192,1	301,8	317,5
1990	179,3	31,3	20,3	27,0	12,5	17,2	40,5	17,1	23,1	11,7	201,0	323,6	332,2

Quelle: Finanzabteilungen GMD und FhG, eigene Erhebung

Tabelle 2 Haushaltsstrukturen GMD und IITB 1984 bis 1990, in Prozent

	1984		1986		1988		1990	
	GMD	IITB	GMD	IITB	GMD	IITB	GMD	IITB
Grundförderung	87,6	39,8	65,0	25,2	67,2	21,5	70,0	20,9
Öffentliche Aufträge	1,9	32,7	16,5	29,6	18,3	27,3	13,3	24,1
Private Aufträge	0,8	22,4	3,1	37,6	5,5	45,0	4,5	49,6

Quelle: Finanzabteilungen GMD und FhG

schung zusammensetzten (Forschungs- und Entwicklungsprogramm FhG 1975/76: 172). Fünf Jahre später war sein Etat bereits auf rund 17 Millionen DM angewachsen und betrug dann 1990 mehr als 31 Millionen DM (vgl. Tabelle 1, Spalte 3), die jetzt zu fast 50 Prozent aus der industriellen Vertragsforschung, etwa 24 Prozent aus öffentlichen Aufträgen und nur mehr zu ca. 21 Prozent aus der Grundförderung des BMFT stammten.

Das industrielle Auftragsvolumen des IITB übertraf damit die vergleichbaren Erträge der GMD von 4,5 Prozent in 1990 nicht nur relativ bei weitem, sondern auch absolut fast um das Doppelte. Während das IITB mit seiner Grundförderung von ca. 6,3 Millionen DM private Aufträge in Höhe von etwa 15,5 Millionen DM mobilisierte, standen der Grundförderung der GMD von mehr als 125 Millionen DM nur 8 Millionen DM an industriellen Geldern gegenüber.²²⁹

Die Anwendungsfelder, auf denen das IITB tätig ist, haben sich in den späten siebziger Jahren nicht grundlegend verändert, seine »Zielgebiete sind insbesondere die industrielle Produktion und Fertigung, die Medizintechnik, die Bürotechnik« (FhG-Forschungsplan 1990: 36). Es arbeitet an kundenspezifischen Problemstellungen, für die es komplette Systemlösungen entwickelt. Größte Auftraggeber des IITB sind die drei »Leitkunden« Thyssen, Siemens und Krupp. Die Aufträge dieser Unternehmen machen etwa dreißig Prozent an der industriellen Vertragsforschung des Instituts aus, das darüber hinaus mit rund vierzig weiteren und zu einem großem Teil mittelständischen Betrieben kooperiert, die über diese Kooperation durchaus auch von

229 Damit ist aber auch durchaus die Gefahr verbunden, daß die Vorhalte- oder Eigenforschung des Instituts Opfer seines eigenen Erfolgs wird. Die Neigung, das Institut gewissermaßen als »Milchkuh« zu behandeln, könnte seine Eigenforschung soweit zum Erliegen bringen, daß es sich nur noch zu einem Subunternehmer und einer Art verlängerten Werkbank seiner Auftraggeber entwickelt (so jedenfalls die Sorge seines ehemaligen Direktors und späteren Präsidenten der FhG, Interview XL).

dessen Leitkunden profitieren. Es unterhält zumeist langfristige Beziehungen zu seinen industriellen Partnern, die aber ständig wechselnde Projektaufträge umfassen. Für die Zusammenarbeit mit den Unternehmen gilt die Regel: »Einmal Kunde, immer Kunde.«²³⁰

An der Schnittstelle zur Wissenschaft bestehen enge Kontakte zu einer Vielzahl von Einrichtungen in der angewandten Informationstechnik und hier vor allem zu der stark ingenieurwissenschaftlich ausgerichteten Fakultät für Informatik an der Universität Karlsruhe, mit der das IITB auch immer wieder Kooperationsprojekte durchführt. Daneben ist es als Gutachter für Projekte der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) tätig und erhält durch diese Funktion wichtige Informationen über die Entwicklung der industrieorientierten Forschung, die über die von ihm selbst und dem Kreis seiner Kunden aktuell bearbeiteten Felder und Themen hinausgehen.

Während das IITB mit anderen Einrichtungen in der angewandten informationstechnischen Forschung eng vernetzt ist, sind seine Beziehungen zur methodischen Grundlagenforschung nur sehr lose geknüpft. Dort genießt es keine sonderliche Reputation²³¹, strebt aber auch keine Anerkennung »im Tempel der Automatentheoretiker« an. Die »Kreise, in denen wir uns bewegen«, so die Institutsleitung, »werden von Applikationen orientiert«. Das IITB könne und wolle sich nicht an der methodischen Diskussion und am »Streit um die reine Lehre« beteiligen. Was die Aufgaben des Instituts angehe, so bestimmten »nicht die Methoden die Applikationen, sondern die Applikationen die Methoden. Wir haben das zu tun, was der Markt von uns will, und wir nehmen das, was dem Ziel nützt«. Man bediene sich pragmatisch der »Komponenten«, die in der methodischen Grundlagenforschung entwickelt werden, habe aber Systemlösungen zu liefern, die weit über das hinausgingen, was die theoretische Informatik liefern könne.

Dies gelte vor allem für das breite Spektrum an »multidisziplinären« Aufgaben, die bei den Entwicklungsarbeiten des Instituts anfielen. Diese multidisziplinäre Aufgabenstruktur des IITB kommt auch darin zum Ausdruck, daß sich die wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts nur zu ca. vierzig Prozent aus Informatikern zusammensetzen, während es zu rund

230 Soweit nicht anders vermerkt, beziehen sich die im folgenden wiedergegebenen Zitate auf zwei Interviews mit der Leitung des IITB (Interviews XXXIX).

231 So bezeugen Vertreter der theoretischen Informatik und formalistischen Schule, die mit der Arbeit des IITB vertraut sind, zwar Respekt vor seinen technischen und wirtschaftlichen Erfolgen, messen ihr aber wenig wissenschaftliche Bedeutung zu und betonen, dies sei »nicht die Art von Informatik wie wir sie uns vorstellen« (Interview XII).

sechzig Prozent Ingenieure aus unterschiedlichen Fachrichtungen wie dem Maschinen- und Anlagenbau beziehungsweise der Fertigungstechnik, aber auch Physiker, Biologen und Psychologen beschäftigt. Zudem genießen die Informatiker im IITB kein besonderes Prestige. »Bei uns werden die Informatiker auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt« und müssen im Zuge ihrer beruflichen Sozialisation am Institut erfahren, daß ihr akademisches Wissen um formale Programmiermethoden in der Praxis des Softwareengineerings nicht ausreicht.

Ebenso wichtig wie ihr programmiertechnisches Know-how sei die Bereitschaft der Mitarbeiter des IITB, mit den industriellen Anwendern zu kooperieren. Um ein Projekt zum Erfolg zu führen, so der Institutsleiter, »müssen die sich gut verstehen«. Die Arbeit des IITB kommt den neueren evolutionären, iterativen und partizipativen Modellen des Softwareengineerings sehr nahe. Am Beginn eines Projekts steht das Lasten- oder Pflichtenheft, in dem in langen und meist schwierigen Verhandlungen zwischen dem Institut und seinen Auftraggebern die grundlegenden Ziele und Anforderungen an das zu erstellende System festgelegt werden. Für das IITB dient das Pflichtenheft dabei in erster Linie dazu, die während des Projektverlaufs unvermeidlich neu auftretenden Gestaltungsmöglichkeiten des Systems und die neuen Anforderungen des Auftraggebers an seine Funktionen zu begrenzen. Vollständig spezifizieren läßt es sich am Beginn eines Projekts aber in aller Regel nicht. Seine Entwicklung und Implementation gleicht vielmehr einer »Evolution vom Urschleim zum arbeitenden System«, in der zudem immer wieder unvorhergesehene Probleme auftauchen, die es erforderlich machen, sein Design in Rückkoppelungsprozessen und erneuten Verhandlungen mit den Auftraggebern zu modifizieren.

Auch die Ziele und Themen der Vorhalte- oder Eigenforschung des Instituts stellen sich auf eher evolutionären Wegen in Rückkoppelungsprozessen mit seinen industriellen Auftraggebern als durch langfristige Planung ein. In diesem Zusammenhang ist zunächst einmal festzuhalten, daß im IITB anders als in der GMD nie der Versuch unternommen wurde, gewissermaßen eine Transferkette von der Grundlagenforschung zur angewandten Forschung zu organisieren. So wenig wie das FhI institutionalisierte Kontakte zur informatischen Grundlagenforschung unterhält, so wenig hat es auch seine Vorhalte- oder Eigenforschung ausdifferenziert und diese Aufgabe spezialisierten Abteilungen oder Arbeitsgruppen übertragen.

Ähnlich wie die Institute auf der Ebene der FhG als Gesamtorganisation konkurrieren auch die einzelnen Abteilungen des IITB um die Mittel aus seiner Grundförderung und staffeln sich in ihrem Prestige nach dem Grad

der Effizienz, mit der sie diese Mittel für die Akquisition von Industrieaufträgen einsetzen. Ort dieser Konkurrenz ist der sogenannte Abteilungsleiterkreis, in dem die Verteilung der Gelder für die Eigenforschung jährlich neu verhandelt wird und dem der Direktor des Instituts vorsitzt, der die formale Entscheidungskompetenz über ihre Allokation besitzt. Die Verhandlungen im Abteilungsleiterkreis sind schwierig und bergen stets als potentiellen Konfliktstoff, daß mit der Entscheidung, die Vorhalteforschung eines bestimmten Bereichs auszubauen, andere in ihren Entwicklungsmöglichkeiten gehemmt werden und »für die mitarbeiten müssen«. Genau dies aber gewährleistet, daß sich die Allokationsstruktur der Grundförderung nicht verfestigt, die zur Verfügung stehende Verteilungsmasse gewissermaßen ständig in Bewegung bleibt und flexibel dort hinfließen kann, wo die größten Erfolgsaussichten für die Akquisition industrieller Aufträge bestehen. Dem IITB ist es damit möglich, sich relativ kurzfristig an unvorhergesehene Entwicklungen anzupassen und beweglich Forschungsthemen aufzugreifen, die unerwartet an Aktualität gewinnen.

So stand in den frühen achtziger Jahren für das IITB nicht anders als für den informationstechnischen Mainstream fest, daß die Zukunft des Softwareengineering in der Entwicklung von KI-Systemen und der Expertensystemtechnik liegen werde. Dementsprechend flossen zu dieser Zeit große Teile seiner Grundförderung in die Eigenforschung auf dem Gebiet der logischen Programmierung, der Expertensystemshells und KI-Tools für die Wissensverarbeitung. Die Förderung dieses Gebiets erhielt jedoch innerhalb des Instituts schon bald Konkurrenz durch die objektorientierte Programmierung, die sich in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre in der Industrie als Alternative zur algorithmischen Programmierung durchzusetzen begann, während zugleich ihr Interesse an der Expertensystemtechnik bereits sank. Die Möglichkeiten, die sich in der objektorientierten Programmierung für die Auftragsforschung des IITB insbesondere bei seinen drei großen Leitkunden auftaten, »triggerten« das Institut gleichsam auf dieses Gebiet, auf das es dann Ende der achtziger Jahre auch konzeptionell zusteuerte und das am Beginn der neunziger Jahre sein Haupttätigkeitsfeld bildete.

Nichtsdestoweniger hat es aber auch seine Arbeiten auf dem Feld der Expertensystemtechnik fortgeführt und anders als die GMD und die akademische KI-Forschung dort auch konkrete Produkte hervorgebracht. Anders als im akademischen Bereich wurde mit den Expertensystemen und der Wissensverarbeitung in der angewandten KI-Forschung am IITB ähnlich wie in der Industrie von Beginn an weniger die Simulation menschlicher Intelligenz als vielmehr eine Technik verbunden, deren Einzug in die indu-

strielle Produktion und Fertigung die Ansprüche an das »requirements engineering« nochmals drastisch erhöhte. Diese eher nüchterne Einstellung gegenüber der Expertensystemtechnik und der Zwang, seinen Ruf als zuverlässiger Partner der Industrie verteidigen zu müssen, führten das IITB nicht zu einem abrupten Rückzug aus dieser Technik, sondern zur Konstruktion von funktionsfähigen Systemen auf einem reduzierten Anspruchsniveau.

So war auch das IITB an den Verbundprojekten TEX-B und TEX-I der GMD beteiligt, entwickelte im Unterschied zur GMD im Zuge dieser Projekte jedoch mehrere funktionstüchtige Expertensysteme zur Überwachung und Fehlerdiagnose von industriellen Produktionsanlagen, die von den beteiligten Unternehmen übernommen wurden und die ihm in der deutschen KI-Forschung den Ruf einbrachten: »Ihr seid die, die die Erfolgserlebnisse haben.« Diese Erfolgserlebnisse blieben aber nicht nur auf die beiden Verbundprojekte beschränkt, sondern weiteten sich auch auf eine Reihe von Projektaufträgen aus mittelständischen Unternehmen aus, für die das IITB ebenfalls wissensbasierte Systeme entwickelte.²³²

Im Vergleich zur GMD vollziehen sich die Anpassungsprozesse des IITB an den raschen technischen Wandel und die Nachfrage der Industrie damit nicht nur wesentlich effizienter, sondern auch auf einem sehr viel niedrigerem Konfliktniveau. Während der Wechsel auf neue Arbeitsgebiete in der GMD stets durch eine Reform »von oben« eingeleitet werden muß und mit einem »hohen Geräuschpegel« (Interview XII) verbunden ist, gehen die Anpassungsprozesse des IITB sehr viel reibungsloser vor sich. Auch dies spricht dafür, die Rolle der GMD im institutionellen Gefüge der bundesdeutschen Forschungslandschaft neu zu überdenken.

Angesichts der schwachen Performanz des Modells der Großforschung in der Informationstechnik bietet sich die kontextgesteuerte Vertragsforschung

232 Am Beispiel eines Expertensystems, das das IITB für den Rühr- und Mischwerkhersteller EKATO entwickelt hat, läßt sich der typische Einsatzbereich solcher Systeme und die Anforderungen, die ihre Entwicklung an das »requirements engineering« stellen, verdeutlichen. Die industrielle Rührtechnik basiert im wesentlichen auf Erfahrungswissen über die Anforderungen, die spezielle Rührgüter an die Konstruktionsmerkmale der Maschinen stellen. Dieses Regelwissen ist in der Summe der Einzelfälle hoch komplex, im Einzelfall aber eher trivial. Daher kann ein Expertensystem das erforderliche Wissen hier tatsächlich in angemessener Form repräsentieren und es etwa Außendienstmitarbeitern ermöglichen, bereits beim Kunden vor Ort die Grundkonfiguration eines Rührwerks zu ermitteln. Die Entwicklung dieses Systems erforderte allerdings eine dreijährige intensive Kooperation zwischen dem Unternehmen und dem Institut, in der die Informatiker des IITB alles über Rührwerke lernen mußten, was sich die Spezialisten des Herstellers in ihrer jahrzehntelangen beruflichen Praxis angeeignet hatten (Interview IX).

als eine attraktive Alternative für die staatliche Organisation dieses Forschungsfeldes an. Wie ihre Entwicklungsgeschichte zeigt, überlastet sich die staatliche Forschungspolitik mit der Steuerung der Forschungsaktivitäten einer Großforschungseinrichtung angesichts der Dynamik und Komplexität dieses Feldes und geht große Risiken ein, mit ihren Selektionsentscheidungen zu scheitern, die sie vermeiden könnte, wenn sie diese Einrichtung zu einer effizienten Selbststeuerung befähigen würde. Sie organisiert mit dem Modell der Großforschung zudem eine enge Koppelung zwischen der informatischen Grundlagenforschung und der angewandten Informationstechnik, die es in dieser Weise nicht gibt und derer es nicht bedarf, und erschwert so ungewollt eine enge Koppelung zwischen den Produzenten und Anwendern und damit eine Koppelung an der Stelle, an der sie dringend erforderlich wäre.

Wenn sich die Forschungspolitik des Bundes hingegen dazu entschließen könnte, auf ihre »Hausmacht« zu verzichten, wäre der Weg frei, die grundlagenorientierten Institute der GMD in die Autonomie der Hochschulforschung zu entlassen und ihre informationstechnischen Einrichtungen auf das schon 1974 geplante »Unternehmensmodell« umzustellen. Dies hätte den doppelten Vorteil, daß sich die Forschungsaktivitäten der GMD stabilisierend am Bedarf der Industrie orientieren könnten und dürfte der erforderlichen engen Kooperation der Forschungsorganisation mit den Anwendern noch am zuträglichsten sein.

Kapitel 8

Fazit: Die Organisationssoziologie als Hilfswissenschaft der Wissenschafts- und Technikforschung

Seitdem der sozialkonstruktivistische Ansatz den Mertonschen Mainstream der sechziger und siebziger Jahre abgelöst hat, spielen die institutionellen Bedingungen und die forschungspolitischen Einflußfaktoren auf die Entwicklung der Wissenschaft in der wissenschaftssoziologischen Diskussion kaum mehr eine Rolle. Mit dem Siegeszug der Science and Technology Studies verschob sich der theoretische und empirische Schwerpunkt der Diskussion hauptsächlich auf die mikrosoziologische Ebene des unmittelbaren Forschungshandelns, auf der sich der institutionelle und politische Kontext, in den dieses Handeln eingebunden ist, nicht oder nur schwer erkennen läßt.

Ein großer Teil der sozialkonstruktivistischen Studien blendete andere Handlungsebenen als die des unmittelbaren Forschungshandelns im Labor sogar lange Zeit konzeptionell aus ihren empirischen Betrachtungen in der Annahme aus, die Entstehung und Validierung des wissenschaftlichen Wissens konsequent auf mikrosoziologische Variablen zurückführen zu können. Damit gerieten sowohl die Mechanismen der Konfliktaustragung und Konsensbildung auf der Ebene der wissenschaftlichen Gemeinschaften als auch staatliche Versuche, die Forschung im Dienste sozialer, politischer und wirtschaftlicher Interessen zu steuern, weitgehend aus dem Blickfeld der neueren Wissenschaftssoziologie.²³³

Demgegenüber zeigen die empirischen Ergebnisse dieser Arbeit, daß die konstruktivistische Wissenschaftssoziologie ebensowenig ohne den Einbezug

233 Dies scheint sich derzeit möglicherweise zu ändern. Karin Knorr-Cetina verweist in einem neueren Überblicksartikel über die Entwicklungen des konstruktivistischen Ansatzes darauf hin, daß es zu seinen Defiziten zählt, die Ebenen der wissenschaftlichen Gemeinschaften und der Forschungspolitik nicht systematisch einbezogen zu haben, und rechnet damit, daß der Konstruktivismus künftig mit dem Neo-Institutionalismus Bekanntschaft machen wird (Knorr-Cetina 1995a: 166).

institutioneller Einflußfaktoren auf die Agenda der Forschung auskommt, wie eine institutionelle Perspektive die Maßnahmen der staatlichen Forschungsförderung heute noch im Sinne des Mertonschen Ansatzes rein als äußere Rahmendaten eines ansonsten autonomen Wissenschaftsbetriebs und das wissenschaftliche Wissen nach wie vor als »black box« behandeln könnte.²³⁴ Diese Arbeit endet folglich, wie sie begann: mit einem Plädoyer dafür, die konstruktivistische und institutionalistische Perspektive miteinander zu verbinden und für eine Erneuerung der wissenschaftssoziologisch-steuerungstheoretischen Diskussion fruchtbar zu machen, die den Interaktionsbeziehungen zwischen der Forschung und forschungspolitischen Steuerungsversuchen nachgeht.

Mit ihrer Überbetonung der Eigenwerte und des Eigensinns der Wissenschaft verstellte sich die Mertonsche Tradition und mit ihr die soziologischen Makrotheorien, die an Merton anknüpften, die Perspektive für die Leistungsanforderungen, die andere gesellschaftliche Handlungssysteme an die Forschung richten, und den Einfluß dieser Anforderungen auf die wissenschaftliche Agenda. Die Wissenschaft ist eine hoch autonome Profession und in der modernen Gesellschaft als einziges gesellschaftliches Handlungssystem dazu legitimiert, einen Anspruch auf »Wahrheit« zu erheben. Zugleich ist sie aber auch wie kaum ein anderes gesellschaftliches Handlungssystem von externen Ressourcen abhängig und bezieht ihre gesellschaftliche Legitimation nicht aus der Suche nach Wahrheit als Selbstzweck, sondern aus den Leistungen, die sie für andere soziale Bereiche erbringt.²³⁵ Das Bild von der autonomen, nach der Maßgabe ihrer selbstreferentiell erzeugten Probleme operierenden Wissenschaft war stets eine Vereinseitigung. Ausdifferenzierung und Vernetzung der voneinander geschiedenen sozialen Be-

234 Insofern kann es auch nur um eine und nicht, wie von Uwe Schimank im Sinne des traditionellen Musters gefordert, um zwei Wissenschaftssoziologien gehen (Schimank 1995a). »Nimm zwei!« (Schimank 1995b), eine wissenssoziologische und eine davon getrennte institutionalistische Wissenschaftssoziologie, ist kein gutes Rezept für einen akteurzentrierten Institutionalismus, der zum Ziel hat, forschungspolitische Steuerungspotentiale und Problemlösungskapazitäten auszuloten. Eine Verbindung zwischen institutionalistischen und konstruktivistischen Ansätzen herzustellen, liegt metatheoretisch im übrigen sehr viel näher, als auf beiden Seiten oft angenommen. Der Institutionalismus ist ein Konstruktivismus, wie sich schon in einer Rückbesinnung auf Gehlen zeigen ließe. Aber dazu ist diese Arbeit nicht der geeignete Ort.

235 Insofern trifft nicht nur die Feststellung zu, »that the development of science is not determined by research, but through the structuring performances which the science system can obligate in society« (Krohn/Küppers 1990: 221), was das »Wissenschaftshandeln« angeht; auch das »Forschungshandeln« richtet sich antizipativ auf gesellschaftliche Leistungserwartungen aus.

reiche sind nur die beiden Seiten ein und derselben Medaille. Und spätestens die seit dem Ende des Zweiten Weltkrieges dominierende Tendenz liegt nicht in Abspaltung der Wissenschaft von der Gesellschaft, sondern in der Vernetzung von Wissenschaft, Politik und Wirtschaft.

Auch die These von der »externen« Determination der wissenschaftlichen Entwicklung, wie sie die materialistischen Gegenspieler der klassischen Wissenschaftssoziologie ins Feld geführt haben, verstellte den Blickwinkel für diese komplexen Vernetzungsprozesse und verfiel nur ins gegenteilige Extrem. Die Entwicklung der Wissenschaft verläuft nicht auf einer kausalen Einbahnstraße in die eine oder andere Richtung und ist weder intern noch extern vollständig determiniert. Ihre kognitive Agenda konstituiert sich in rekursiven Interaktionsprozessen, in denen wissenschaftliche Akteure Rahmenbedingungen für die Wahrnehmungen, Erwartungen und Handlungen der für sie relevanten gesellschaftlichen Akteure, und die gesellschaftlichen Akteure Rahmenbedingungen für die Wahrnehmungen, Erwartungen und Handlungen der wissenschaftlichen Akteure setzen. Dabei greift die staatliche Forschungspolitik mit ihren Allokationsentscheidungen heute tief in diese Agenda ein und beeinflusst nicht nur die Wahl der Forschungsthemen, sondern ebenso den »cognitive style« (Fuchs 1992) der Wissenschaft. Und sie tut dies unter der Bedingung hoher Entscheidungsungewißheit und hoch kontingenter Handlungsfolgen. Doch dies bedeutet nicht, daß sich grundsätzlich keine Muster und Regelmäßigkeiten in den Interaktionsbeziehungen zwischen der Forschungspolitik und ihren wissenschaftlichen Adressaten identifizieren ließen und die Wissenschaftssoziologie angesichts der Kontingenz dieser Beziehungen zu resignieren und sich forschungspolitischer Aussagen gänzlich zu enthalten hätte.

Die gesellschaftlichen Leistungserwartungen an die Wissenschaft, ihre eigene Orientierung an gesellschaftlichen Problemen und ihre Vernetzung mit ihren gesellschaftlichen Nachbarsystemen gerieten erstmals systematisch durch die Kuhnsche Wissenschaftssoziologie ins Blickfeld. Allerdings faßte auch dieser Ansatz das zirkuläre Wechselspiel zwischen der Forschung, Politik und Wirtschaft immer noch nicht radikal genug. Vor dem Hintergrund einer Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung als Abfolge paradigmatischer Reifestadien, hatten die Bielefelder Studien die »Resistenz« der Forschung gegenüber externen Interventionen bei weitem über- und ihre »Rezeptivität« für forschungspolitische Maßnahmen bei weitem unterschätzt. Zugleich veranschlagten sie damit aber auch die Handlungs- und Entscheidungssicherheit der Forschungspolitik viel zu hoch.

Im Rahmen des Kuhnschen Modells erschienen die Beziehungen zwischen der Forschung und der Forschungspolitik noch als lineare Transferbeziehungen, in denen sich die politischen Akteure auf sichere Entscheidungsgrundlagen stützen konnten und letztlich als eine Art neutrale Abnehmer von Forschungsergebnissen fungierten. Die institutionellen Gestaltungsmöglichkeiten der Politik waren von kognitiven Variablen abhängig, die sich durch staatliche Maßnahmen nur marginal verändern ließen. In der Phase der paradigmatischen und theoretischen Konsolidierung einer Disziplin konnte die Politik allenfalls orientierend auf die Forschung einwirken, mußte aber auf steuernde Eingriffe verzichten, die so lange auf den Widerstand der Gemeinschaft trafen, wie noch die ungelösten theoretischen Probleme im Vordergrund der wissenschaftlichen Diskussion standen. Erst mit dem Übergang der Forschungsergebnisse zur Anwendungsreife wurde das Feld dann forschungspolitischen Maßnahmen zugänglich. Die staatliche Forschungspolitik konnte die Forschungsaktivitäten jetzt mit ordnender Hand und im Interesse einer effizienten Umsetzung des theoretischen Wissens in technische Artefakte auf die verbleibenden Anwendungsprobleme bündeln. Forschungspolitische Entscheidungsunsicherheiten und Kontingenzen kamen in diesem Modell nicht vor, da das Forschungsfeld im Zuge seiner theoretischen Konsolidierung die Phase der paradigmatischen Ungewißheit ja bereits erfolgreich und autonom überwunden hatte.

Wie bereits die Befunde der Bielefelder Studien zur »Geplanten Forschung« selbst zeigten, zeichnet sich empirisch ein wesentlich komplexeres Bild von der Interaktion zwischen der Wissenschaft und der Forschungspolitik ab, das eher einem »rekursiven Durcheinander« (Krohn/Küppers 1989) als einer geordneten Abfolge von Phasen mit jeweils spezifischen Handlungsoptionen gleicht. Anders als im linearen oder unidirektionalen Modell Kuhns gibt es empirisch keine eindeutige Kausalrichtung von der Wissenschaft zur Technologie. Statt einer linearen Abfolge von paradigmatischen Stadien weist die wissenschaftliche Entwicklung stark heterogene Verlaufsformen auf, deren Ramifikationen und Verzweigungen sowohl von »innen« als von »außen« induziert werden können. Wissenschaft und Technologie lassen sich nur in einem idealtypischen Sinne als unterschiedliche Sinn- und Handlungssysteme auffassen, realtypisch sind sie aber untrennbar miteinander verwoben und beeinflussen sich in ihrer Evolution wechselseitig. Price hat für diese komplexe Interaktion bereits 1965 die ebenso schöne wie trefende Metapher von der Wissenschaft und Technologie als »dancing partners« geprägt, die in einem mal langsameren, mal schnelleren Tanz ihre

Bewegungen jeweils an den Bewegungen des anderen ausrichten, und bei denen es nicht klar ist, wer wen führt (Price 1965, 1984; vgl. auch Rip 1992).

Obwohl Kuhn bei der Entwicklung seines Modells nicht zuletzt die Kernphysik vor Augen hatte, ist gerade diese Disziplin ein Paradebeispiel für die heterogene Dynamik der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung mit ihren unerwarteten Ramifikationen und Bifurkationen. Das Phänomen der Kernspaltung wurde weder theoretisch erwartet, noch ließ es sich im Rahmen der kernphysikalischen Theorien vollständig erklären. Seine Entdeckung war das unerwartete Nebenprodukt einer physikalischen Grundlagenforschung, die sich völlig andere theoretische Fragen gestellt und alles andere als technische Ziele gesetzt hatte. In gleicher Weise war der Computer wie die Kernspaltung eine unerwartete Entdeckung und keine paradigmatisch angeleitete Entwicklung. Er ging seinerseits aber wiederum, anders als die Kernforschung, nicht aus der Wissenschaft, sondern aus der Technik und aus experimentellem Konstruieren hervor und hat erst dann eine Wissenschaft von der Programmierung induziert. Allerdings ist auch die Computer science nicht in der Wissenschaft entstanden. Nicht die Mathematik als ihre vermeintliche Mutter-Disziplin hat die Informatik zur Welt gebracht, sondern die großen militärischen Nachkriegsprojekte der amerikanischen Regierung mit ihren wachsenden technischen und wirtschaftlichen Problemen.

Die Informatik steht gleichzeitig beispielhaft dafür, daß greifbar nahe scheinende technische Ziele und als »anwendungsreif« geltende Theorien bei dem Versuch ihrer Umsetzung scheitern und tief in die Grundlagenforschung mit völlig neuen Forschungsfragen führen können. Technologische Programme können zu völlig neuen wissenschaftlichen Forschungsfeldern führen, die Entstehung neuer Disziplinen oder Spezialitäten und ganze paradigmatische Wechsel auslösen. So schien die Verifikationsforschung zeitweise kurz vor dem Durchbruch zu stehen, wurde dann jedoch weit in mathematische Grundlagenfragen zurückgeworfen. In ähnlicher Weise waren es erst staatliche Programme, die am Ende der siebziger Jahre gegen massiven Widerstand der etablierten Informatik aus einer kleinen Zahl von vereinzelt KI-Forschern eine rasch wachsende wissenschaftliche Gemeinschaft werden ließen. Das Ausmaß, in dem die KI-Forschung an ihren technischen Aufgaben gescheitert ist, kam dann sogar für ihre Kritiker überraschend, und die Identität und Entwicklungsrichtung des neuen interdisziplinären Grundlagenfachs der »cognitive science«, das an ihre Stelle getreten ist, liegt noch vollkommen im unklaren. Beide Beispiele zeigen, daß die forschungspolitische Debatte in der Wissenschaftssoziologie der siebziger Jahre mit ihrem

Rekurs auf das Kuhnsche Modell das Maß der Ungewißheit und Kontingenz des wissenschaftlichen Wissens zweifellos bei weitem unterschätzt hat.

Allerdings verfiel der Sozialkonstruktivismus, der die Kuhnsche Theorie Anfang der achtziger Jahre als wissenschaftssoziologischen Mainstream ablöste, in dem dann ebenso die forschungspolitisch-institutionell orientierte Debatte versank, wiederum nur in das gegenteilige Extrem. Über ihr Ziel, die genuin »soziale Natur« der Wissenschaft aufzudecken, haben sich die Science and Technology Studies heute in einer Hyper-Kontingenztheorie des wissenschaftlichen Wissens festgefahren, die es weder erlaubt, zwischen kognitiven und sozialen Einflußfaktoren auf die wissenschaftliche Entwicklung zu unterscheiden, noch eine Differenz zwischen »innen« und »außen«, also zwischen der Rationalität des wissenschaftlichen Handelns und der Rationalität anderer gesellschaftlicher Bereiche zu ziehen. Diese Hyper-Kontingenztheorie läßt auch keine systematischen Vergleiche zwischen unterschiedlichen Forschungsgebieten zu. Aus ihrer Perspektive scheint alles Wissen gleichermaßen kontingent und idiosynkratisch zu sein.

Auch dies dürfte nicht zuletzt damit zusammenhängen, daß sich die sozialkonstruktivistischen Studien hauptsächlich auf die mikrosoziologische Ebene beschränken und ihr Horizont zumeist an den Mauern des Labors endet. Sie verengen damit ihr Blickfeld auf den Aspekt von »science in making« und folglich auf den Ausschnitt im Prozeß des Forschungshandelns, in dem Fakten und Theorien erst im Entstehen begriffen und noch hoch ungewiß sind, vernachlässigen aber deren Karrieren auf der Ebene der wissenschaftlichen Gemeinschaften und insbesondere im Zusammenhang mit technischen Anwendungen. Aber auch dort, wo der Sozialkonstruktivismus »science in action« studiert, wie im Rahmen des netzwerktheoretischen Konzepts von Bruno Latour, kommt er nicht über das Bild einer essentiellen Beliebigkeit des wissenschaftlichen Wissens hinaus. Dabei mag Pasteur durchaus ein Meister in der Inszenierung der Wissenschaft und Bildung von strategischen Allianzen gewesen sein, und der Siegeszug seines Konzepts auch weithin auf diesen extrafunktionalen Fertigkeiten basiert haben (Latour 1987). Aber die »Pasteurisierung Frankreichs« wäre undenkbar gewesen und seine Theorien hätten schwerlich eine »Leiter der Faktizität« erklimmen können, wenn sich seine Lehre von den Mikroben und seine Methoden, Mikroorganismen zu schwächen, nicht ebenso als robuste theoretische und methodische Standards erwiesen hätten, die erfolgreiches Problemlösungshandeln zuließen. Überhaupt spricht Latours Fallstudie zu Pasteur epistemologisch ganz und gar nicht für eine relativistische Position und ist in ihrer Stoßrichtung letzt-

lich auch weniger in einem wissenschaftssoziologischen, als in einem modernisierungstheoretischen Sinne interessant.

So bleibt es nach wie vor unabdingbar, zwischen kognitiven und sozialen Einflußfaktoren auf die wissenschaftliche Entwicklung zu differenzieren, wengleich sich eine solche Unterscheidung im übrigen nicht mehr auf die Kuhnsche Lehre von den »Reifestadien« wissenschaftlicher Theorien stützen kann. Die Widerlegung der traditionellen Vorstellung vom privilegierten kognitiven Status der Wissenschaft durch die Science and Technology Studies und die Feststellung, daß das wissenschaftliche Wissen konstruiertes Wissen ist, bedeuten nicht notwendigerweise, daß es »sozial bedingt« ist, was auch immer sich mit diesem Begriff im einzelnen verbinden lassen mag. Die berechtigte Kritik des Konstruktivismus am traditionellen Rationalmodell des Forschungshandelns impliziert vielmehr, daß es notwendig ist, dieses Handeln konzeptionell auf den Typus und das Maß an Rationalität zu reduzieren, das jeder gewöhnlichen Form von professionellem Handeln unterliegt. Natürlich geht in der Wissenschaft, wie Merton betont hat, epistemisch Außergewöhnliches vor, wenn man ihre handlungsleitenden Orientierungen mit denen anderer gesellschaftlicher Teilsysteme vergleicht. Die moderne Wissenschaft basiert wie kein anderes soziales System auf der »Institutionalisierung sachlicher Kritik« (Luhmann 1970: 241) und setzt wie kein anderes soziales Handlungsfeld Prämien auf kognitive Innovationen aus (Whitley 1984). Sie verfügt aber in der Tat über keine privilegierte Rationalität, sondern ist wie jede andere Form des sozialen, wirtschaftlichen oder politischen Handelns auch mit »bounded rationality« konfrontiert und auf Strategien des »satisficing« angewiesen.

Wie nicht zuletzt die in dieser Arbeit herangezogenen Fallbeispiele zeigen, bestand das, was die Kuhnsche Theorie fälschlich als »kognitive Reife« am Ende eines sukzessiven Prozesses der paradigmatischen Konsolidierung wissenschaftlicher Theorien interpretiert hat, in der erfolgreichen Reduktion von Ungewißheit auf ein robustes und befriedigendes Set von kognitiven Standards. Die Theorie der Kernspaltung steht nicht nur beispielhaft für die heterogenen Verlaufsformen der wissenschaftlichen Entwicklung, sondern auch für ein Modell des Forschungshandelns als Problemlösungshandeln, das sich unter der Bedingung eingeschränkter Rationalität an robusten Standardlösungen und »funktionierenden Kausalitäten« orientiert. Das Bohr/Wheelersche Tröpfchenmodell des Atomkerns liefert eine befriedigende Erklärung des Phänomens der Kernspaltung, die ganz im Sinne Hackings (1983, 1992) in einer wechselseitigen Anpassung von experimentellen Befunden und theoretischen Bausteinen entwickelt und zudem nur soweit vor-

angetrieben wurde, wie dies für die technische Beherrschung dieses Phänomens erforderlich war.²³⁶ In ähnlicher Weise galt dies ebenso für die Entdeckung und theoretische Deutung des Computers. In diesem Fall begnügte sich die Mathematik und frühe Computer science zunächst so lange damit, das Modell der Turingmaschine auf den neuen Rechnertypus zu übertragen, wie dies seinem Einsatz als numerisches Gerät angemessen war. Erst in dem Maße, wie diese Standardlösung den wachsenden Komplexitätsproblemen der softwaretechnischen Entwicklung nicht mehr genügte, kam es zu Modifikationen und Erweiterungen dieses Modells in Form der abstrakten Hochsprachen. Allerdings führte der Weg in die Abstraktion auch zu einer heterogenen Vielfalt von neuen konzeptionellen Möglichkeiten, die es bis heute nicht erlaubt haben, das Gebiet der Programmierung auf ein Standardset von Theorem und Methoden zu reduzieren.

Mit einer solchen Modellierung des Forschungshandelns als Problemlösungshandeln wird es nun zugleich möglich, unterschiedliche Forschungsfelder in ihren unterschiedlichen sozialen Organisationsformen und Interaktionsbeziehungen mit ihrer politischen und wirtschaftlichen Umwelt systematisch miteinander zu vergleichen. Wenn man ein Fazit der empirischen Teile dieser Arbeit zieht, so bestätigt sich die an ihrem Beginn formulierte Ausgangsvermutung, daß sich die Kernphysik und Kerntechnik bzw. Informatik und Informationstechnik im Licht der Organisationssoziologie als entgegengesetzte Pole auf einem Kontinuum von Aufgabenungewißheit und Aufgabeninterdependenz fassen lassen und eine solche Kontrastierung der beiden Untersuchungsfälle zugleich eine Antwort auf die Frage liefern kann, warum sich die kerntechnische Forschung in erfolgreicher Weise als Großforschung organisieren ließ und zum Vorbild der staatlichen Forschungsorganisation schlechthin werden konnte, während die informatische Großforschung stets Probleme aufwarf.

In dem bei Charles Perrow (1970) entliehenen Modell von Whitley entspricht ein Forschungsfeld, auf dem sich eine starke wechselseitige Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten mit einer geringen Aufgabenungewißheit verbindet, dem Typus der Kuhnschen Normalwissenschaft, in der es möglich ist, einheitliche theoretische und methodische Standards zu entwickeln, klar definierte Forschungsprioritäten festzulegen und die noch ausstehenden

236 Wenngleich die Entwicklung der Theorie der Kernspaltung der Vorstellung von paradigmatischen Phasen widerspricht, war der Begriff der »Finalisierung« (Böhme/van den Daele/Krohn 1973: 133–134) diesem Muster der Schließung theoretischer Kontroversen dennoch nicht unangemessen.

Rätsel in kumulativen Wissensfortschritten zu lösen. Die soziale Struktur eines solchen Feldes kommt einer professionell integrierten Bürokratie mit deutlich sichtbaren und stabilen Reputationszentren gleich. Es ist weitgehend hierarchisch stratifiziert und weist eine hohe Kohärenz und Integration auf. Seine Führungseliten sind dazu in der Lage, für das gesamte Feld zu sprechen und seine Interessen nach außen zu vertreten. Sie sind kollektiv handlungsfähig und können stabile Netzwerkbeziehungen mit der Politik und Wirtschaft eingehen, in denen ein kooperativer Verhandlungsstil vorherrscht und die forschungspolitischen Prioritäten konsensuell festgelegt werden. Auf einem Forschungsfeld mit hoher wechselseitiger Abhängigkeit der Forschungsaktivitäten und geringer Aufgabenungewißheit verfügt daher die Forschungspolitik, dem organisationssoziologischen Schema Whitleys zufolge, über große Planungs- und Entscheidungssicherheit und kann ihre Maßnahmen in stabiler Weise steuernd auf bestimmte Ziele ausrichten.

Dies ist ihr jedoch auf einem Forschungsgebiet, auf dem sich eine geringe Aufgabeninterdependenz mit hoher Ungewißheit der Forschungsaufgaben paart, nicht in stabiler Weise möglich. Hier prognostiziert das Whitleysche Modell eine starke Konkurrenz zwischen den wissenschaftlichen Akteuren und eine schwache Koordination der Forschung. Das Feld gleicht einer fragmentierten »adhocracy« und produziert laufend theoretische und methodische Innovationen, die sich aber nicht systematisch aufeinander beziehen und nicht kumulativ aufeinander aufbauen. Dies wird es schwierig machen, einheitliche theoretisch-methodische Standardpakete zu schnüren. Die Auswahl der theoretischen und methodischen Forschungsziele hängt vielmehr stark von lokalen Präferenzen ab und unterliegt fluktuierenden Prioritäten. Reputationszentren, die das Feld als Ganzes vertreten, werden sich hier kaum und nur temporär stabilisieren können. Dementsprechend werden ebenso die Entscheidungen der Forschungspolitik in starkem Maße von kontingenten Faktoren abhängen. Das Netzwerk zwischen den wissenschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Akteuren ist fragil und von wechselnden Akteurskonstellationen geprägt. Verhandlungen werden hier als Koordinationsmechanismen des Feldes weitgehend versagen und statt dessen werden sich evolutionäre Lösungen einstellen.

Diese beiden Extremaltypen einer professionellen Bürokratie und einer fragmentierten »adhocracy« kommen nun in der Tat den beiden hier untersuchten Fällen sehr nahe. So entsprach die Kernforschung, soweit es die Spaltungs- und Reaktorphysik betraf, durchaus einer professionell integrierten Bürokratie mit geordneten Forschungsprioritäten, stabil prognostizierbaren Forschungsergebnissen, einer hierarchisch stratifizierten Sozialstruktur

und kollektiv handlungsfähigen Reputationszentren. Bis zur Entdeckung des Phänomens der Kernspaltung war auch die Atomphysik ein wenig integriertes Forschungsgebiet mit vielen unzusammenhängenden experimentellen und theoretischen Beiträgen. Die Entdeckung von Otto Hahn ließ dann aber aus diesem Gebiet fast augenblicklich ein hoch kohäsives Feld werden, auf dem sich alle Anstrengungen auf die Entwicklung der »Uranmaschine« konzentrierten. Über ihre technischen Erfolge und die stabile Reproduzierbarkeit ihrer experimentellen Ergebnisse ging die Physik der Kernspaltung sehr bald in eine Normalwissenschaft über, die neben einem robusten Standardset von reaktorphysikalischen Theoremen und Methoden mit der Brütertechnologie auch über klar definierte Forschungsziele verfügte.

Gegen Ende der sechziger Jahre war die Reaktorphysik weitgehend erforscht und gab keine grundlegenden Rätsel mehr auf. Zugleich unterteilten sich die kerntechnischen Optionen von Beginn an in das Nahziel auf, mit dem Bau von relativ einfach konstruierten Leistungskraftwerken einer ersten Generation zunächst in der nuklearen Energieerzeugung Fuß zu fassen, um dann die Entwicklung von reaktorphysikalisch sehr viel komplexeren Brutreaktoren einer fortgeschrittenen Generation als das Fernziel der Kernenergiestrategie in Angriff zu nehmen. Soweit es die Leistungsreaktoren betraf, sah man sich zwar mit einer unerwarteten Vielzahl von Reaktortypen konfrontiert, deren Vorzüge und Nachteile heftig umstritten waren; im Fall der Brutreaktoren reduzierte sich die Auswahl mit den Plutonium- und Thoriumbrütern aber auf genau zwei technische Linien, die das konkurrenzlose Optimum auf dem Gebiet der nuklearen Energieerzeugung und den »Königsweg« zur bestmöglichen Nutzung der Kernenergie darstellten.

Obwohl in ihren theoretischen und methodischen Ausgangsfragen nach wie vor zerstritten, konnte sich die Gemeinschaft der Kernphysiker, soweit es das Feld der Reaktorforschung und -entwicklung betraf, auf der Basis ihrer technischen Erfolge zu einer weitgehend von Konsens getragenen und kollektiv handlungsfähigen Profession entwickeln, die sich um eine zahlenmäßig kleine Elite hoch reputierter Forscher zentrierte. Die Mitglieder dieser kleinen Gruppe von reputierten Kernphysikern stiegen nach dem Zweiten Weltkrieg zu einer forschungspolitischen Führungselite auf, die gewissermaßen als Knotenpunkt innerhalb des atompolitischen Netzwerks fungierte, das sich im Zuge der staatlichen Kernenergieprogramme in der Bundesrepublik etablierte.

Wie im Rahmen des Modells von Whitley durchaus zu erwarten, scheiterte dieses forschungspolitische Netzwerk jedoch zunächst an der Aufgabe, die Nahziele der Atompolitik auf dem Wege von Verhandlungen zu bestimm-

men. Angesichts der heterogenen Vielfalt von möglichen Reaktortypen der ersten Generation und einer entsprechend hohen Entscheidungsungewißheit sah sich die Deutsche Atomkommission nicht dazu in der Lage, instruktive und konsensfähige Empfehlungen auszusprechen. Die Selektion der Leichtwasserlinie als Standard unter den Leistungsreaktoren entschied sich dementsprechend auf einem evolutionären Weg und durch einen klassischen »Lock-in-Prozeß«, mit dem sich eine zumindest zum damaligen Zeitpunkt suboptimale Technologie durchsetzte.

Damit endete zugleich aber auch die Phase der Entscheidungsunsicherheit in der Atompolitik, da durch die Etablierung eines Standards unter den Reaktoren der ersten Generation das energiepolitische Nahziel erreicht war und sich nun alle Aktivitäten auf die Entwicklung der zweiten Reaktorgeneration als des Haupt- und Fernziels konzentrieren konnten, bei dem kaum mehr Ambiguitäten bei der Wahl der Technologie auftraten, sich die Zahl der Alternativen mit den Plutonium- und Thoriumbrütern auf genau zwei komplementäre technische Linien reduzierte und dessen reaktorphysikalische Machbarkeit prinzipiell bereits geklärt war.

Mit diesen Bedingungen waren alle Voraussetzungen für den Erfolg des Modells der staatlich geplanten Großforschung gegeben. Nach einer anfänglichen Phase der Ungewißheit ließen sich die atompolitischen Ziele, was die Generation der fortgeschrittenen Reaktoren anging, eindeutig und konsensuell bestimmen, während sich die Forschungspolitik genau zwei »große« Aufgaben zu eigen machen und an Forschungseinrichtungen delegieren konnte, deren Aktivitäten auf jeweils einen Reaktortyp gebündelt, sicher vorausgeplant und arbeitsorganisatorisch aufgeteilt werden konnten. Beide Forschungsorganisationen verfügten damit langfristig über stabile Forschungsdomänen und Aufgabendefinitionen, die es ihnen erlaubten, eine ebenso stabile organisatorische Kultur oder »corporate identity« mit stark missionsorientierten Zügen zu entwickeln.

Die Kooperation der beiden Einrichtungen mit der Industrie besaß ebenfalls eine sichere Grundlage und ließ sich arbeitsteilig im Rahmen eines seriellen Modells von Forschungstransfer mit klaren Lieferbeziehungen von der Wissenschaft in die Technik organisieren. Die Industrie besaß nach dem Siegeszug des Leichtwasserreaktors ebenfalls klare Präferenzen für die Brütertechnologie und trat dann als Abnehmer der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung in den beiden Zentren auf. Auf der Basis der klaren Zielstruktur der Vorhaben und der stabilen Lieferbeziehungen zwischen der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung und der industriellen Entwicklung konnte die staatliche Forschungspolitik nach dem Abschluß der explorativen

Phase auch die Kontrolle über die Projekte im Rahmen von »hybrid« zusammengesetzten Komitees übernehmen und den Transferprozeß durch teils minutiöse Anweisungen und Anordnungen hierarchisch koordinieren.

Der zum größten Teil reibungslose und kaum von Konflikten überschattete Verlauf der Projekte wirkte zudem wiederum stabilisierend auf das forschungspolitische Netzwerk zwischen den Akteuren aus der Kernphysik, staatlichen Administration und Industrie zurück, das zeitweise über sein Unvermögen, die Nahziele der deutschen Atompolitik zu bestimmen, auseinanderzufallen drohte, sich dann aber im Zuge der erfolgreichen Realisierung ihrer Haupt- und Fernziele zu einer hochkohäsiven »nuclear community« entwickelte, die sich um die beiden kerntechnischen Großforschungseinrichtungen zentrierte.

Vor diesem Hintergrund lag es nahe, das Modell der Großforschung zu verallgemeinern und auf andere Forschungsgebiete zu übertragen. Aber Großforschung ist kein generalisierbares und auf allen Forschungsgebieten gleichermaßen effizientes Modell von Forschungsorganisation. Nicht jede Art von Forschung und nicht jede Form der Produktion wissenschaftlichen Wissens ist mit dieser forschungsorganisatorischen Struktur gleichermaßen kompatibel. Das Modell war dem speziellen Fall der Kernphysik und Kerntechnik angemessen, auf dem Gebiet der Informatik und Informationstechnik jedoch versagen die Mittel der hierarchischen Koordination weitgehend. Auf ihrem Weg »nach oben« reduzierten sich die Forschungsziele in der Kerntechnik auf nur zwei optimale Maschinen, während zugleich der Grad der Ungewißheit der Forschungsaufgaben mit den kumulativen Wissensfortschritten in der Reaktorphysik sank. In der Informatik ist es dagegen bislang weder möglich, so etwas wie eine optimale informationstechnische Maschine zu definieren, noch schreitet dieses Forschungsfeld kumulativ voran.

Die Informatik ist als eine formale Ingenieurwissenschaft von den Algorithmen entstanden, die zur Aufgabe hatte, die Programmierung durch mathematische Methoden zu vereinheitlichen und zu normieren. Das Fach verfügte aber nur für kurze Zeit über theoretisch-methodische Konzepte und Forschungsziele, die zu der Hoffnung Anlaß gaben, daß es die technische Praxis wissenschaftlich anzuleiten vermochte, und es ist an dieser Aufgabe heute großenteils gescheitert. Die Softwaretechnik entwickelt sich nach wie vor weitgehend unabhängig von der formalen Theoriebildung und ist mit ihr nur sehr lose verkoppelt.

Sie ist heute in eine unüberschaubare Fülle von Anwendungen vorgedrungen und dem wissenschaftlichen Wissen über die Konstruktionsprinzipien von informationsverarbeitenden Maschinen weit vorausgelaufen, während es

zugleich die Informatik nicht vermocht hat, ihre Grundlagenforschung auf bestimmte theoretische und methodische Kernfragen einzuengen, und selbst eine überschießende Vielfalt von formalen Deutungen des Computers hervorgebracht hat. Statt die Programmierung auf einige wenige abstrakte Prinzipien zurückführen zu können, taten sich gerade durch ihre konzeptionelle Loslösung von den physikalischen Maschinen immer neue und mit deren Verarbeitungskapazitäten ständig wachsende Möglichkeiten der theoretischen und methodischen Beschreibung des Computers auf. Auch die rasanten Leistungssteigerungen der Hardwaresysteme gingen dabei unmittelbar auf die Verselbständigung der Programmierung zu einer eigenständigen Technik zurück.

Die Verselbständigung dieser Technik ermöglichte es, daß sich der Computer als physikalische Maschine zu einem homogenen Standardprodukt der Elektronik mit klar definierten Eigenschaften und spezifizierten Komponenten entwickeln und sich die elektronische Forschung auf dieses Standardprodukt mit dem einzigen Entwicklungsziel immer kleinerer und leistungsfähigerer Prozessoren spezialisieren konnte. Als physikalische Maschine hat der Computer für die Elektronik daher eine ähnlich orientierende und zentrierende Funktion, wie sie zunächst der »Uranbrenner« und später die Reaktoren der zweiten Generation für die Kerntechnik besaßen. Als abstrakte Maschine, als die ihn die Informatik erforscht, hat er sich dagegen mit den rasant wachsenden softwaretechnischen Anwendungen und seinen immer vielfältigeren Deutungsmöglichkeiten, die sich im Zuge der mikroelektronischen Revolution eröffneten, jedoch nie stabil fixieren und auf ein Standardset von Theoremen und Methoden reduzieren lassen.

Der Computer ist der Informatik als Forschungsgegenstand aber auch deshalb entglitten, weil mit Vordringen der Softwaretechnik und ihrem Wandel von einer reinen Rechentechnik zu einer nahezu universellen Querschnittstechnik anwendungsspezifische Wissenskomponenten über die zu modellierenden Gegenstandsbereiche immer stärker an Bedeutung gewonnen haben. Was als Weg in die Abstraktion und Quantifizierung gedacht war, führte in die Komplexität des Einzelfalls und in die qualitative Modellierung kontextspezifischer Anforderungen an die Systeme, die sich dem formalen Instrumentarium der Informatik entziehen. Dementsprechend ist das Fach heute weiter denn je davon entfernt, der softwaretechnischen Praxis klare Ziele und Mittel vorgeben zu können. Eine Art »Brutcomputer« ist in der Informatik nicht in Sicht.

Als Folge der großen Zielambiguitäten und hohen Ungewißheit der Forschungsaufgaben hat sich die Informatik auch nicht zu einer kollektiv handlungsfähigen Profession entwickeln können. Sah sich die Nuklearphysik

nach einer anfänglichen Phase der Unsicherheit schließlich dazu in der Lage, die Technologie der zweiten Reaktorgeneration konsensuell zu bestimmen, so sind die Versuche, das Feld kooperativ zu koordinieren, in der Informatik bislang weitgehend gescheitert. Alle Projekte, die mit ALGOL, PL/I oder Ada zum Ziel hatten, auf dem intensiv erforschten Gebiet der Programmiersprachen einen technologischen Standard zu definieren, erlitten infolge des mangelnden Konsenses unter den Experten Schiffbruch, und auf anderen Teilgebieten wie dem der Telekommunikation oder der Betriebssysteme verhält es sich ähnlich. Die immensen theoretischen und methodischen Möglichkeiten, informationstechnische Systeme zu modellieren, machen es in der Informatik sehr schwierig, Konsens über ihr technologisches Design zu erzielen, und lassen die entsprechenden Verhandlungen in Komitees und Kommissionen zu einem schwachen Instrument der Standardisierung des Feldes werden. Da aufgrund der hohen positiven Netzwerkexternalitäten von Konventionen zugleich aber ein hoher Bedarf an der Normierung der Informationstechnik besteht, bilden sich die Standards hier so gut wie ausschließlich durch »Bandwagon-Effekte« und »Lock-in-Prozesse« heraus.

In der Informatik haben sich bislang auch keine stabilen Reputationszentren entwickeln können, die das Feld als Ganzes vertreten und nach außen repräsentieren. Solche Zentren kristallisierten sich nur für kurze Zeit heraus, als das Ziel der Programmverifikation in greifbarer Nähe schien und sich seine Verfechter an die Spitze der Entwicklung setzen konnten. Sie bildeten sich aber in dem Maße wieder zurück, wie sich mit der wachsenden Komplexität der Programme dieses Ziel als nicht erreichbar erwies.

Nach einer kurzen Phase relativer Stabilität am Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre verstrickte sich das Feld als Folge der immer größeren programmiertechnischen Möglichkeiten und zunehmenden Pluralisierung der theoretischen und methodischen Konzepte, die von der mikroelektronischen Revolution induziert wurden, dann in zum Teil heftige Richtungskonflikte und in eine wachsende Konkurrenz um Forschungsressourcen. Parallel zum raschen Wandel der Softwaretechnik und vielfach durch die softwaretechnische Entwicklung ausgelöst, entstanden seit der Mitte der siebziger Jahre mit den explosionsartig steigenden Verarbeitungskapazitäten der Maschinen auf dem Gebiet der Programmiersprachen, der Datenbanksysteme, der Telekommunikation, der Computersimulation bis hin zu den konkurrierenden Ansätzen in der KI-Forschung immer neue informatische Forschungsrichtungen, die zu stark fluktuierenden Forschungsprioritäten, zum Teil auch zu schnell wieder verschwindenden Modeerscheinungen und rasch wechselnden Reputationszuschreibungen führten.

Zugleich wurde das lineare Modell vom Softwareengineering, wie es sich Ende sechziger Jahre mit der Lehre vom Softwarezyklus herausgebildet hatte, mit der zunehmenden Bedeutung anwendungsspezifischer Wissenskomponenten in der Informationstechnik und im Zuge eines curricularen Konflikts zwischen »Formalisten« und »Intuitionisten« von rekursiven, interaktiven und evolutionären Modellen der Programmierung abgelöst, die die duale Struktur der Informatik als einer formalen und hermeneutischen Wissenschaft betonen. Diese Modelle fassen die Programmierung nicht mehr nur als formale Umsetzung gegebener Systemanforderungen, sondern als einen genuin sozialen Prozeß, der einer engen Kooperation zwischen den Produzenten und Anwendern bedarf und in dem das Design der Programme durch Verhandlungen bestimmt und im Zuge wechselseitiger Wahrnehmungsveränderungen entsteht.

Anders als ihre Vorbilder in der Kerntechnik konnte die informatische Großforschung unter diesen Bedingungen weder eine klare Zielstruktur entwickeln, noch stabile Transferbeziehungen mit ihren Adressaten in der technischen und wirtschaftlichen Praxis eingehen. Während sich auf der Basis der geordneten Forschungsprioritäten in der Kerntechnik ein regulatives Netzwerk herausbildete, in dem die forschungspolitischen Ziele konsensuell ausgehandelt und »top down« festgelegt wurden, und das sich über den erfolgreichen Transfer der reaktorphysikalischen Grundlagenforschung in die industrielle Kerntechnik weiter verfestigte, waren die Beziehungen zwischen der Wissenschaft, Politik und Wirtschaft im Fall der informatischen Großforschung von Beginn an fragil. Mit den fluktuierenden und konkurrierenden Zielvorstellungen in der Informationstechnik und Informatik wechselten sich auch die Akteurskonstellationen rasch ab.

Damit lief das Modell der Großforschung auf dem Gebiet der Informatik in den Termini des organisationssoziologischen Schemas von Whitley faktisch auf ein »Garbage-can-Modell« hinaus, in dem die Forschungspolitik als Folge einer stark eingeschränkten Rationalität hoch kontingente und riskante Entscheidungen treffen mußte. Einmal gesetzte Ziele wurden beständig durch neue und unvorhergesehene Entwicklungen entwertet und abgelöst, erwiesen sich als nicht realisierbar, von nur geringem Nutzen oder gar als vorübergehende Mode, während lohnendere Ziele der forschungspolitischen Aufmerksamkeit entgingen. Im Ergebnis entstand so eine heterogene Vielzahl von Forschungsvorhaben, deren Auswahl und Fortbestand nur »historisch« erklärbar ist.

Fiel die Wahl der Forschungspolitik in der Frühphase der informatischen Großforschung zunächst auf die Mathematik, so sollte dann im Zuge der

sich etablierenden Informatik die Softwaretechnologie den Kern der informationstechnischen Großforschung ausmachen. Deren formale Methoden und Konzepte wurden durch die softwaretechnische Praxis jedoch rasch entwertet oder scheiterten an faktischen Standards und ließen es nicht zu, die Forschungsaktivitäten der GMD an einer identitätsbildenden Aufgabe zu orientieren. Statt dessen gab die Gesellschaft den Rahmen für ad hoc definierte Klein- und Kleinstprojekte ab, die letztlich über nichts hinausgingen, was die Industrie und die kommerzielle Softwaretechnik nicht hätten selbst bewerkstelligen können.

Über den wiederholten und erneut fehlgeschlagenen Versuch, der informatischen Großforschung eine einheitliche Struktur zu verleihen, setzte die Forschungspolitik dann im Zuge eines internationalen Wettbewerbs um die Führungsrolle in einer vermeintlich neuen Basistechnologie auf die KI-Forschung und das Scientific supercomputing und erlitt damit abermals Schiffbruch. Während die KI-Forschung ebensowenig wie bereits zuvor die Softwaretechnologie ihre Versprechen einhalten konnte, brachte der informationstechnische Markt im Bereich der parallelen Rechnerarchitekturen selbst einfachere, kostengünstigere und leistungsfähigere Lösungen als die informatische Großforschung hervor. Dementsprechend kündigte auch die Industrie, soweit sie überhaupt dazu bereit war, ihre Kooperation mit der staatlichen Forschungspolitik rasch wieder auf.

Hindert schon die kontingente Vielfalt von möglichen Forschungszielen und Forschungsthemen die informatische Großforschung daran, eine klare Identität und organisatorische Kultur zu entfalten, so vergrößert sich dieses Problem noch durch die Kluft, die auf diesem Gebiet zwischen der Grundlagenforschung und der softwaretechnischen Entwicklung besteht. Während es im Falle der kerntechnischen Großforschung möglich war, die Grundlagenforschung und technische Entwicklung im Rahmen eines seriellen Transfermodells eines »von innen nach außen« gerichteten Transferprozesses zu organisieren, ist eine solche Integration auf dem Gebiet der Informatik nicht auf stabiler Basis möglich. Das Feld der Informatik wird in hohem Maße durch die softwaretechnische Entwicklung »von außen nach innen« bestimmt, die ihrerseits keiner engen Koppelung mit der Wissenschaft, sondern, wie dies sowohl die Ablösung des linearen Modells der Softwareengineering durch zyklische, interaktive und evolutionäre Modelle der Programmierung, als auch das Schicksal der Expertensystemtechnik gezeigt hat, einer engen Kooperation mit ihren Anwendern bedarf.

Faktisch lavierte die staatliche Forschungspolitik mit ihren Versuchen, die informatische Grundlagenforschung und die softwaretechnische Anwen-

dungsforschung im Rahmen des Modell des Großforschung zu integrieren, zwischen »Scylla und Charybdis« (Mayntz 1995) und schuf gerade mit diesen Versuchen organisationsinterne Spannungen, die es an beiden Polen erschwerten, angemessene Forschungsstrategien zu entwickeln. Darüber hinaus macht auch der Vergleich der informatischen Großforschung mit dem Modell der anreizfinanzierten Vertragsforschung deutlich, daß »organization matters« und die Performanz von Forschungsorganisationen weithin von ihrem institutionellen Design abhängt. Dieses Modell entspricht gewissermaßen einer institutionalisierten »adhocracy«, die der ungewissen Entwicklungsdynamik der Informationstechnik in höherem Maße angepaßt ist als die Großforschung, und schafft zugleich eine enge Koppelung zwischen den Produzenten und Anwendern. Wie wiederum vor allem das Beispiel der KI-Forschung und Expertensystemtechnik zeigt, erlaubt es zudem, Fehlentwicklungen rascher zu korrigieren. Der forschungspolitische Wert genau dieser Option ist auf Gebieten mit hoher Entscheidungsunsicherheit kaum als gering zu veranschlagen.

Wenngleich es viele empirische Aspekte, die für den hier angestellten Vergleich der Kernphysik und Informatik relevant sind, nicht erfaßt, hat sich das von Whitley vorgeschlagene organisationssoziologische Schema am Ende doch als eine »zutreffende Vereinfachung« bewährt. Die von diesem Schema beschriebenen funktionalen Zusammenhänge decken sich weitgehend mit den empirischen Grundmustern in der Entwicklungsdynamik dieser beiden Disziplinen und ihrer Interaktionsbeziehungen mit der staatlichen Forschungspolitik. Insofern dürfte es sich lohnen, dieses Modell im Sinne einer Forschungsstrategie des »satisficing« mit der Hilfe zusätzlicher Fallbeispiele wie etwa der Biotechnologie oder auch der chemischen Forschung weiterzuentwickeln und im Lichte neuer empirischer Befunde zu revidieren und zu modifizieren. Eines der grundlegenden Probleme dieses Schemas besteht dabei darin, daß die analytischen Variablen zu grob sind und nicht genügend differenzieren. So zeigt sich etwa, daß die Variable Aufgabenungewißheit nicht zwischen Zielppluralität und Ungewißheit im Hinblick auf die Realisierbarkeit von Zielen unterscheidet, und daß sich die Größe Aufgabeninterdependenz sowohl auf den Grad der Koppelung zwischen der Grundlagenforschung und Anwendungsforschung als auch auf interdisziplinäre Kooperationsformen beziehen kann. Ein anderes Defizit des Schemas besteht darin, daß es die Interaktionseffekte zwischen den Variablen Aufgabenungewißheit und der Interdependenz der Forschungsaktivitäten ebenfalls noch weitgehend ungeklärt läßt. Wenn es aber gelänge, das Modell in dieser Hinsicht weiter zu elaborieren, zu ergänzen und reicher zu gestalten, wäre viel ge-

wonnen. Es könnte dann dazu beitragen, die Wissenschaftssoziologie wieder und aus einer neuen Perspektive an die makrosoziologische, organisationssoziologische und institutionalistische Theoriebildung anzubinden und ihr damit möglicherweise den Weg zu einer »normalen« soziologischen Teildisziplin unter anderen zu ebnet.

Literatur

- Ahrweiler, Petra, 1995a: *Künstliche Intelligenz-Forschung in Deutschland. Die Etablierung eines Hochtechnologie-Fachs*. Münster: Waxmann.
- , 1995b: KI West und KI Ost: Die Institutionalisierung eines Hochtechnologie-fachs in Deutschland. In: Werner Rammert (Hrsg.), *Soziologie und Künstliche Intelligenz. Produkte und Probleme einer Hochtechnologie*. Frankfurt a.M.: Campus, 111–132.
- Ammon, Rainer von/Markus Fröhlich/Stefan Grainer, 1987: C – schwieriger als andere Hochsprachen? In: *Chip Plus*, Beilage in *Chip* 10/1987, 4–7.
- Arthur, Brian, 1989: Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. In: *The Economic Journal* 99, 116–131.
- Ashmore, Malcolm, 1989: *The Reflexive Thesis: Writing Sociology of Scientific Knowledge*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Aspray, William, 1990: *John von Neumann and the Origins of Modern Computing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Backus, John, 1980: Programming in America in the 1950's – Some Personal Impressions. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 125–136.
- Bauer, Friedrich L., 1974: Was heißt und was ist Informatik? Merkmale zur Orientierung über eine neue wissenschaftliche Disziplin. In: *IBM* Nr. 223, 333–337.
- , 1980: Between Zuse and Rutishauser – The Early Development of Digital Computing in Central Europe. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 505–524.
- , 1991: Informatik und Algebra. In: Manfred Broy (Hrsg.), *Informatik und Mathematik*. Berlin: Springer, 28–42.
- , o.J.: Die ALGOL-Verschwörung. Manuskript. München.
- Bayer, Janice, M./John M. Stevens, 1975: Unterschiede zwischen einzelnen Wissenschaften im Hinblick auf Forschungsaktivität und Produktivität. In: Nico Stehr/

- René König (Hrsg.), *Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, 249–374.
- Bemer, Robert W., 1969: A Politico-Social History of Algol (With a Chronology in the Form of a Log Book). In: Mark I. Halpern et al. (Hrsg.), *Annual Review in Automatic Programming* 5. Oxford: Pergamon Press, 151–237.
- Ben-David, Joseph, 1971: *The Scientist's Role in Society. A Comparative Study*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Bethe, Hans: 1979: The Happy Thirties. In: Roger H. Stuewer (Hrsg.), *Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis, MI: University of Minnesota Press, 213–324.
- Beuschel, Werner, 1995: Expertensysteme im Betrieb: Fallstudien in den USA zu Auswirkungen auf Arbeitsorganisation und Qualifikation. In: Werner Rammert (Hrsg.), *Soziologie und Künstliche Intelligenz. Produkte und Probleme einer Hochtechnologie*. Frankfurt a.M.: Campus, 299–334.
- Bibliographisches Institut (Hrsg.), 1981: *Meyers enzyklopädisches Lexikon*. Mannheim: Lexikonverlag.
- Birnbaum, Joel S., 1982: Computers: A Survey of Trends and Limitations. In: *Science* 215, 760–765.
- Blanché, Robert, 1970: *La logique et son histoire d'Aristote à Russell*. Paris: Colin.
- Bloomfield, Brian P., 1986: *Modelling the World. The Social Constructions of Systems Analysts*. Oxford: Blackwell.
- , (Hrsg.), 1987: *The Question of Artificial Intelligence: Philosophical and Sociological Perspectives*. London: Croom Helm.
- , 1989: On Speaking About Computing. In: *Sociology: The Journal of the British Sociology Association* 23, 409–426.
- Bloor, David, 1976: *Knowledge and Social Imagery*. London: Routledge & Kegan Paul.
- , 1985: Sociology of Science. In: Adam Kuper/Jessica Kuper (Hrsg.), *The Social Science Encyclopedia*. London: Routledge & Kegan Paul, 733–735.
- BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie): *Bundesbericht Forschung III, 1969*. Bonn: BMFT.
- Bochenski, Joseph, M., 1956: *Formale Logik*. Freiburg i.Br.: Alber.
- Böhme, Gernot/Wolfgang van den Daele/Wolfgang Krohn, 1972: Alternativen in der Wissenschaft. In: *Zeitschrift für Soziologie* 1, 302–316.
- , 1973: Die Finalisierung der Wissenschaft. In: *Zeitschrift für Soziologie* 2, 128–144.
- , 1974: Die Finalisierung der Wissenschaft. In: Werner Diederich (Hrsg.), *Theorien der Wissenschaftsgeschichte: Beiträge zur diachronischen Wissenschaftstheorie*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 276–311.
- , 1978: The »Scientification« of Technology. In: Wolfgang Latour et al. (Hrsg.), *The Dynamics of Science and Technology. Social Values, Technical*

- Norms and Scientific Criteria in the Development of Knowledge.* Dordrecht: Reidel, 219–250.
- Bohr, Niels/John Archibald Wheeler, 1979 [1939]: The Mechanism of Nuclear Fission. In: Horst Wohlfarth (Hrsg.), 40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 141–190.
- Bonsiepen, Lena/Wolfgang Coy, 1992: Eine Curriculardebatte. In: Informatik Spektrum 15, 323–325.
- Brix, Peter, 1989: Die folgenreiche Entdeckung der Uranspaltung – und wie es dazu kam. Festvortrag aus Anlaß der Entdeckung der Kernspaltung vor 50 Jahren. In: MPG Spiegel 1989/1, 41–48.
- Brock, Gerald W., 1986: The Computer Industry. In: Walter Adams (Hrsg.), The Structure of American Industry. 7. Auflage. New York: Macmillan Press, 239–260.
- Brooks, Frederick P., 1987: Vom Mythos des Mann-Monats. Essays über Software-Engineering. Bonn: Addison Wesley.
- , 1995: No Silver Bullet: Essence and Accidents of Software Engineering. In: Nick Heap et al. (Hrsg.), Information Technology and Society. London: Sage, 358–376.
- Brown, Laurie M./Lillian Hoddeson, 1983: The Birth of Elementary Particle Physics: 1930–1950. In: Laurie M. Brown/Lillian Hoddeson (Hrsg.), The Birth of Elementary Particle Physics. Based on a Fermilab Symposium. Cambridge: Cambridge University Press, 3–38.
- Broy, Manfred, 1991: Methodische Grundlagen der Programmierung. In: Manfred Broy (Hrsg.), Informatik und Mathematik. Berlin: Springer, 355–365.
- Buchholz, Klaus, 1979: Die gezielte Förderung und Entwicklung der Biotechnologie. In: Wolfgang van den Daele et al. (Hrsg.), Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 64–116.
- Bupp, Irvin C./Jean-Claude Derian, 1981: The Failed Promise of Nuclear Power. The Story of Light Water. New York: Basic Books.
- Burks, Arthur W., 1980: From ENIAC to the Stored-Program Computer: Two Revolutions in Computers. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays. New York: Academic Press, 311–344.
- Burns, Tom/George M. Stalker, 1961: The Management of Innovation. London: Tavistock.
- Callon, Michel, 1986: The Sociology of an Actor-Network. The Case of the Electric Vehicle. In: Michel Callon et al. (Hrsg.), Mapping the Dynamics of Science and Technology. Sociology of Science in the Real World. Houndmills: Macmillan Press, 19–34.

- Callon, Michel/Bruno Latour, 1992: Don't Throw the Baby Out with the Bath School! A Reply to Collins and Yearly. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 343–368.
- Ceruzzi, Paul, 1986: An Unforeseen Revolution: Computers and Expectations. 1935 to 1985. In: Joseph J. Corn (Hrsg.), *Imagining Tomorrow: History, Technology, and the American Future*. Cambridge, MA: MIT Press, 188–201.
- , 1989: Electronics, Technology and Computer Science, 1940–1975: A Coevolution. In: *Annals of the History of Computing* 10, 257–275.
- Chadwick, James, 1932a: Possible Existence of a Neutron. In: *Nature* 129, 312.
- , 1932b: The Existence of a Neutron. In: *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 136*, 692–708.
- Chevalley, Catherine, 1988: Physical Reality and Closed Theories in Werner Heisenberg's Early Papers. In: Diderik Batens/Jean Paul van Bendegem (Hrsg.), *Theory and Experiment. Recent Insights and New Perspectives on Their Relation*. Dordrecht: Reidel, 159–176.
- Clarke, Arthur C., 1987: Extra-Terrestrial Relays. In: Anthony E. Cawkell (Hrsg.), *Evolution of an Information Society*. London: Aslib, 216–222.
- Clarke, Adele E., 1990: A Social Worlds Research Adventure: The Case of Reproductive Science. In: Susan Cozzens/Thomas E. Gieryn (Hrsg.), *Theories of Science in Society*. Bloomington, IN: Indiana University Press, 15–42.
- Cole, Stephen, 1992: *Making Science. Between Nature and Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Collins, Harry M., 1981: Son of Seven Sexes: The Social Destruction of a Physical Phenomenon. In: *Social Studies of Science* 11, 33–62.
- , 1985: *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practise*. London: Sage.
- , 1990: *Artificial Experts. Social Knowledge and Intelligent Machines*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Collins, Harry M./Steven Yearly, 1992a: Epistemological Chicken. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 301–326.
- , 1992b: Journey into Space. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 369–389.
- Collins, Randall, 1988: Book Review – Richard Whitley: *The Intellectual and Social Organization of the Sciences*. In: *Theory and Society* 17, 291–299.
- Cowan, Robin, 1990: Nuclear Power Reactors: A Study in Technology Lock-In. In: *The Journal of Economic History* 1, 541–567.
- Coy, Wolfgang, 1992a: Informatik – Eine Disziplin im Umbruch? In: Wolfgang Coy et al. (Hrsg.), *Sichtweisen der Informatik*. Braunschweig: Vieweg, 1–12.
- , 1992b: Für eine Theorie der Informatik! In: Wolfgang Coy et al. (Hrsg.), *Sichtweisen der Informatik*. Braunschweig: Vieweg, 17–32.

- , 1993: Reduziertes Denken. Informatik in der Tradition des formalistischen Forschungsprogramms. In: Peter Scheffe et al. (Hrsg.), *Informatik und Philosophie*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag, 31–52.
- , 1994a: Die Turing-Galaxis. In: Wolfgang Coy, *Computer als Medien. Drei Aufsätze*. Informatik Bericht 3/94. Bremen, 1994: Universität Bremen, 7–14.
- , 1994b: Aus der Vorgeschichte des Mediums Computer. In: Wolfgang Coy, *Computer als Medien. Drei Aufsätze*. Informatik Bericht 3/94. Bremen: Universität Bremen, 15–32.
- , 1994c: Die Entfaltung programmierbarer Medien. In: Wolfgang Coy, *Computer als Medien. Drei Aufsätze*. Informatik Bericht 3/94. Bremen: Universität Bremen, 33–40.
- , 1994d: *Reduziertes Denken. Informatik in der Tradition des formalistischen Forschungsprogramms*. Informatik Bericht 2/94. Bremen: Universität Bremen.
- Coy, Wolfgang/Lena Bonsiepen, 1989: *Erfahrung und Berechnung. Kritik der Expertensystemtechnik*. Berlin: Springer.
- Crane, Diana, 1972: *Invisible Colleges. Diffusion of Knowledge in Scientific Communities*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Czada, Roland, 1992: Administrative Interessenvermittlung am Beispiel der kerntechnischen Sicherheitsregulierung in den Vereinigten Staaten und der Bundesrepublik Deutschland. Habilitationsschrift. Konstanz: Universität Konstanz.
- , 1993: Konfliktbewältigung und politische Reform in vernetzten Entscheidungsstrukturen. In: Roland Czada/Manfred G. Schmidt (Hrsg.), *Verhandlungsdemokratie, Interessenvermittlung, Regierbarkeit. Festschrift für Gerhard Lehmbuch*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 73–100.
- Daele, Wolfgang van den/Wolfgang Krohn/Peter Weingart, 1979: Die politische Steuerung der wissenschaftlichen Entwicklung. In: Wolfgang van den Daele et al. (Hrsg.), *Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 11–63.
- Dahl, Ohle-Johan/Edsger W. Dijkstra/C.A.R. Hoare, 1972: *Structured Programming*. London: Academic Press.
- David, Paul A., 1985: Clio and the Economics of QWERTY. In: *American Economic Review* 75, 332–337.
- Degele, Nina, 1995: Vom Nutzen nicht genutzter Expertensysteme. In: Werner Rammer (Hrsg.), *Soziologie und Künstliche Intelligenz. Produkte und Probleme einer Hochtechnologie*. Frankfurt a.M.: Campus, 275–298.
- Demant, Bernd, 1993: *Fuzzy-Theorie oder die Faszination des Vagen. Grundlagen einer präzisen Theorie des Unpräzisen für Mathematiker, Informatiker und Ingenieure*. Braunschweig: Vieweg.
- Dengel, Andreas, 1994: *Künstliche Intelligenz. Allgemeine Prinzipien und Modelle*. Mannheim: BI-Taschenbuchverlag.

- Dijkstra, Edsger W., 1972: Notes on Structured Programming. In: Ohle-Johan Dahl et al. (Hrsg.), *Structured Programming*. London: Academic Press, 1–82.
- , 1980: A Programmer's Early Memories. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 563–574.
- , 1989: On the Cruelty of Really Teaching Computer Science. In: *Comm. of the ACM* 32, 1398–1404.
- Dolotta, Ted A. et al., 1976: *Data Processing in 1980–1985. A Study of Potential Limitations to Progress*. New York: Wiley.
- Donth, Hans, 1984: Der Aufbau der Informatik an deutschen Hochschulen. In: *Elektronische Rechenanlagen* 26, 223–228.
- Dreyfus, Hubert L., 1985: *Die Grenzen künstlicher Intelligenz: Was Computer nicht können*. Königstein/Ts.: Athenäum.
- Dreyfus, Hubert L./Stuart E. Dreyfus, 1988: Making a Mind Versus Modeling the Brain: Artificial Intelligence Back at a Branchpoint. In: Stephen R. Graubard (Hrsg.), *The Artificial Intelligence Debate. False Starts, Real Foundations*. Cambridge, MA: MIT Press, 15–44.
- Duden, 1993: *Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis*. Hrsg. von Hermann Engesser. 2. Auflage. Mannheim: Dudenverlag.
- Duhem, Pierre, 1906: *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris: Hermann.
- Eberlein, Gerald/Norbert Dietrich, 1983: *Die Finalisierung der Wissenschaften. Analyse und Kritik einer forschungspolitischen Theorie*. Freiburg: Alber.
- Eckert Presper J./John W. Mauchly, 1980: The ENIAC. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 525–540.
- Edge, David O./Michael J. Mulkay, 1975: Fallstudien zu wissenschaftlichen Spezialgebieten. In: Nico Stehr/René König (Hrsg.), *Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, 197–229.
- Eggeling, Jörn, 1984: GOTO – REPEAT UNTIL. Schwierigkeiten mit der Software. In: *Kursbuch* 75/1984, 75–88.
- , 1985: *Die Industrialisierung von Programmierarbeit*. Frankfurt a.M.: Lang.
- Ehn, Pelle, 1988: *Work Oriented Design of Computer Artifacts*. Stockholm: Arbetslivscentrum.
- Elkana, Yehuda, 1992: Erwin Schrödinger as Historian. Notes Towards an Interpretation. In: Johann Götschel (Hrsg.), *Erwin Schrödingers World View. The Dynamics of Knowledge and Reality*. Dordrecht: Kluwer, 115–134.
- Everett, Robert R., 1980: WHIRLWIND. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 365–384.
- Farrell, Joseph/Garth Saloner, 1988: Coordination Through Committees and Markets. In: *Rand Journal of Economics* 19, 235–252.

- Feigenbaum, Edward A./Julian Feldman (Hrsg.), 1963: *Computers and Thought*. New York: McGraw-Hill.
- Feigenbaum, Edward A./Pamela McCurduck/H. Penny Nii, 1988: *The Rise of the Expert Company*. New York: 1st Vintage Books.
- FhG (Fraunhofer-Gesellschaft), 1975/76: *Forschungs- und Entwicklungsprogramm 1975/76*. Karlsruhe: Fraunhofer-Gesellschaft.
- , 1990: *FhG-Forschungsplan 1990*. Karlsruhe: Fraunhofer-Gesellschaft.
- Flamm, Kenneth, 1987: *Targeting the Computer. Government Support and International Competition*. Washington, DC: The Brookings Institution.
- , 1988: *Creating the Computer. Government, Industry, and High Technology*. Washington, DC: The Brookings Institution.
- Fleck, Ludwik, 1980 [1935]: *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einführung in die Lehre vom Denkstil und Denkkollektiv*. Frankfurt a.M., 1980: Suhrkamp.
- Fleck, James, 1982: Development and Establishment in Artificial Intelligence. In: Norbert Elias et al. (Hrsg.), *Scientific Establishments and Hierarchies*. Dordrecht: Reidel.
- Floyd, Christiane, 1987: Outline of a Paradigm Change in Software Engineering. In: Gro Bjernkes et al. (Hrsg.), *Computers and Democracy – A Scandinavian Challenge*. Aldershot: Avebury, 191–210.
- , 1994: Software Engineering – und dann? In: *Informatik-Spektrum* 17, 29–37.
- Flügge, Siegfried, 1979 [1939]: Kann der Energieinhalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden? In: Horst Wohlfarth (Hrsg.), *40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 119–140.
- Frederichs, Günther, 1995: Künstliche Intelligenz und Markt: Kann man mit der Anwendung der KI ein Geschäft machen? In: Werner Rammert (Hrsg.), *Soziologie und Künstliche Intelligenz. Produkte und Probleme einer Hochtechnologie*. Frankfurt a.M.: Campus, 335–358.
- Fuchs, Stephan, 1986: The Social Organization of Scientific Knowledge. In: *Sociological Theory* 4, 126–142.
- , 1992: *The Professional Quest for Truth. A Social Theory of Science and Knowledge*. New York: State University of New York Press.
- Fuchs, Stephan/Jonathan H. Turner, 1986: What Makes a Science ›Mature‹?: Patterns of Organizational Control in Scientific Production. In: *Sociological Theory* 4, 143–150.
- Fujimura, Joan, H., 1987: Constructing Doable Problems in Cancer Research: Articulating Alignment. In: *Social Studies of Science* 17, 257–239.
- , 1988: The Molecular Biological Bandwagon in Cancer Research: Where Social Worlds Meet. In: *Social Problems* 35, 262–283.
- , 1992: Crafting Science: Standardized Packages, Boundary Objects, and Translation. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*.

- Chicago, IL: University of Chicago Press, 168–214.
- Furger, Franco, 1993: *Informatik-Innovationen aus der Schweiz? Lilith/Diser und Oberon*. Zürich: Technopark Zürich.
- Galison, Peter, 1987: *How Experiments End*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Gardner, Howard, 1989: *Dem Denken auf der Spur. Der Weg der Kognitionswissenschaft*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Genschel, Philipp, 1995: *Standards in der Informationstechnik. Institutioneller Wandel in der internationalen Standardisierung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Genschel, Philipp/Raymund Werle, 1993: From National Hierarchies to International Standardization: Historical and Modal Changes in the Coordination of Telecommunications. In: *Journal of Public Policy* 13, 203–225.
- Gerson, Elihu, 1983: Scientific Work and Social Worlds. In: *Knowledge* 4, 357–377.
- Gerwin, Robert, 1976: *So ist das mit der Kernenergie. Von der Kernspaltung zum Strom*. Düsseldorf: Econ.
- Geser, Hans, 1975: Paradigmatischer Konsens in Forschungsorganisationen. In: Nico Stehr/René König (Hrsg.), *Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, 305–327.
- Giere, Ronald N., 1988: *Explaining Science. A Cognitive Approach*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Gieryn, Thomas E., 1982: Relativist/Constructivist Programmes in the Sociology of Science: Redundance and Retreat. In: *Social Studies of Science* 12, 279–297.
- Gill, Karamjit S., 1986: *Artificial Intelligence for Society*. Chichester: Wiley Interscience.
- GMD (Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung): *GMD-Jahresberichte 1970, 1971, 1979, 1988*. GMD: Sankt Augustin.
- , *GMD-Spiegel 1977, 1983, 1989*. GMD: Sankt Augustin.
- , 1985: *Forschungs- und Entwicklungsprogramm*. GMD: Sankt Augustin.
- Goepfert-Mayer, Maria, 1979 [1948]: On Closed Shells in Nuclei. In: Horst Wohlfahrt (Hrsg.), *40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 312–321.
- Goldstine, Herman H., 1972: *The Computer from Pascal to Neumann*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Goldstine, Herman H./John von Neumann, 1963 [1946]: On the Principles of Large Scale Computing Machines. In: John von Neumann, *Collected Works, Vol. 5*. Oxford: Oxford University Press. (Lecture given by von Neumann on 15. May 1946.)
- Gooding, David, 1992: Putting Agency Back into Experiment. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 65–112.
- Goos, Gerhard, 1994: Programmieretechnik zwischen Wissenschaft und industrieller Praxis. In: *Informatik-Spektrum* 17, 11–20.

- Grundmann, Reiner, 1996: *Mending the Ozone Layer. The Role of Transnational Policy Networks*. MPIfG Discussion Paper 96/8. Köln: Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung.
- , 1997: Transnationale Umweltpolitik: Der Fall der Ozonschicht. Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht im nationalen und internationalen Maßstab. USA und Bundesrepublik Deutschland im Vergleich, 1974–1992. Habilitationsschrift. Bielefeld: Universität Bielefeld.
- Hacking, Ian, 1983: *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- , 1992: The Self-Vindication of the Laboratory Sciences. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 29–64.
- Häfele, Wolf, 1963: Neuartige Wege naturwissenschaftlich-technischer Entwicklung. In: Der Bundesminister für Wissenschaftliche Forschung (Hrsg.), *Die Projektwissenschaften*. München: Gerbach & Sohn, 17–38.
- , 1984: Großforschungszentren gestern und heute. Die Entwicklung des Schnellen Brütters. Eine Entgegnung an Otto Keck. In: *Politische Vierteljahresschrift* 25(3), 316–319.
- Hahn, Otto, 1975: *Erlebnisse und Erkenntnisse*. Düsseldorf: Econ.
- Halfmann, Jost, 1984: *Die Entstehung der Mikroelektronik. Zur Produktion technischen Fortschritts*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Hargens, Lowell L., 1975: Anomie und Dissens in wissenschaftlichen Gemeinschaften. In: Nico Stehr/René König (Hrsg.), *Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, 375–392.
- Hasse, Raimund, 1995: Forschungsorganisierung. Studien zur organisatorischen Vergesellschaftung des naturwissenschaftlich-technischen Fortschritts – dargestellt an Fallbeispielen aus dem Bereich der gentechnischen Pflanzenforschung. Dissertation. Bielefeld: Universität Bielefeld.
- Hasse, Raimund/Georg Krücken/Peter Weingart, 1993: *Laborkonstruktivismus: Eine wissenschaftssoziologische Reflexion*. Bielefeld: Institut für Wissenschafts- und Technikforschung der Universität Bielefeld.
- , 1995: Social Expectations and Internal Dynamics of Science. A Neoinstitutional Approach. Paper presented at the EASST/ERASMUS Workshop ›Social Theory and Social Studies of Science‹, Universität Bielefeld, 9.–12.5.1995.
- Haugeland, John, 1986: *Artificial Intelligence: The Very Idea*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Heidelberger, Michael, 1993: Was erklärt uns die Informatik? Versuch einer wissenschaftstheoretischen Standortbestimmung. In: Peter Schefe et al. (Hrsg.), *Informatik und Philosophie*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag, 13–30.
- Heintz, Bettina, 1993a: *Die Herrschaft der Regel. Zur Grundlagengeschichte des Computers*. Frankfurt a.M.: Campus.

- , 1993b: Wissenschaft im Kontext. Neuere Entwicklungstendenzen der Wissenschaftssoziologie. In: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 45, 528–552.
- Heisenberg, Werner, 1965: *Das Naturbild der heutigen Physik*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- , 1981 [1973]: Der Begriff der kleinsten Teilchen in der Entwicklung der Naturwissenschaft. In: Bibliographisches Institut (Hrsg.), *Meyers enzyklopädisches Lexikon*. Band 2. Mannheim: Lexikonverlag, 870–879.
- , 1984: *Schritte über Grenzen*. München: Piper.
- Hiebert, Erwin, 1988: The Role of Experiment and Theory in the Development of Nuclear Physics in the Early 1930s. In: Diderik Batens/Jean Paul van Bendegem (Hrsg.), *Theory and Experiment. Recent Insights and New Perspectives on Their Relation*. Dordrecht: Reidel, 55–76.
- Hippel, Eric von, 1988: *The Sources of Innovation*. New York: Oxford University Press.
- Hoare, Charles A.R., 1972: Notes on Data Structuring. In: Ohle-Johan Dahl et al. (Hrsg.), *Structured Programming*. London: Academic Press, 83–174.
- , 1984: Der neue Turmbau zu Babel. Rede zur Verleihung des Turing-Preises der ACM, 1980. In: *Kursbuch* Heft 75, 57–74.
- , 1989: The Mathematics of Programming. In: Charles A.R. Hoare, *Essays in Computing Science*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 351–370.
- Hodges, Andrew, 1989: *Alan Turing, Enigma*. Berlin: Kammerer & Unverzagt.
- Hohlfeld, Rainer, 1979: Strategien gegen den Krebs – Die Planung der Krebsforschung. In: Wolfgang van den Daele et al. (Hrsg.), *Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 181–238.
- Hohn, Hans-Willy, 1984: *Die Zerstörung der Zeit. Wie aus einem göttlichen Gut eine Handelsware wurde*. Frankfurt a.M.: Fischer.
- Hohn, Hans-Willy/Uwe Schimank, 1990: *Konflikte und Gleichgewichte im Forschungssystem. Akteurkonstellationen und Entwicklungspfade in der staatlich finanzierten außeruniversitären Forschung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Hohn, Hans-Willy/Volker Schneider, 1990: Path-Dependency and Critical Mass in the Development of Science and Technology. In: *Science and Public Policy* 18, 111–121.
- Hopfield, J.J./D.W. Tank, 1985: ›Neural‹ Computation of Decisions in Optimization Problems. In: *Biological Cybernetics* 52, 141–152.
- Hoschka, Peter/Uwe Kalbhen (Hrsg.), 1975: *Datenverarbeitung in der politischen Planung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Hughes, Thomas, 1986: The Seamless Web. Technology, Science, Etcetera, Etcetera. In: *Social Studies of Science* 16, 281–292.

- Hurd, Cuthbert C., 1980: Computer Development at IBM. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 389–419.
- Huskey, Harry D., 1980: The SWAC: The National Bureau of Standards Western Automatic Computer. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 419–432.
- Iburg, Holger, 1991: *Abschreckung und Software. Computertechnologie als Instrument der amerikanischen Sicherheitspolitik*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Karp, Richard, 1989: Antwort auf Dijktras ›On the Cruelty of Really Teaching Computer Science‹. In: *Comm. of the ACM* 32, 12, 1410–1412.
- Kaufmann, Hans, 1974: *Die Ahnen des Computers. Von der phönizischen Schrift zur Datenverarbeitung*. Düsseldorf: Econ.
- Keck, Otto, 1984: *Der schnelle Brüter. Eine Fallstudie über Entscheidungsprozesse in der Großtechnik*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1965: Projekt Schneller Brüter. Ausführliche Erläuterung zu den Anträgen zur Bereitstellung der Mittel für die Erstellung der Unterlagen zum Bau der Prototypen des Schnellen Brüters. Manuskript. Karlsruhe.
- Khazam, Jonathan/David C. Mowery, 1994: The Commercialisation of Risk: Strategies for the Creation of Dominant Designs. In: *Research Policy* 23, 89–102.
- Kirchner, Ulrich, 1991: *Der Hochtemperaturreaktor. Konflikte, Interessen, Entscheidungen*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Kittler, Friedrich A., 1987: *Aufschreibsysteme*. München: Fink.
- Kline, Stephen Jay/Nathan Rosenberg, 1986: An Overview of Innovation. In: Nathan Rosenberg/Ralph Landau (Hrsg.), *The Positive Sum Strategy*. Washington, DC: National Academy Press, 275–306.
- Knorr-Cetina, Karin, 1982: The Constructivist Programme in the Sociology of Science: Retreats or Advances? In: *Social Studies of Science* 12, 320–324.
- , 1984: *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaften*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- , 1995a: Laboratory Studies. The Cultural Approach in the Study of Science. In: Sheila Jasanoff et al. (Hrsg.), *Handbook of Science and Technology Studies*. Thousand Oaks: Sage, 140–166.
- , 1995b: How Superorganisms Change: Consensus Formation and the Social Ontology of High Energy Physics Experiments. In: *Social Studies of Science* 25, 119–147.
- Knorr-Cetina, Karin/Michael J. Mulkay, 1983: Introduction. Emerging Problems in Social Studies of Science. In: Karin Knorr-Cetina/Michael J. Mulkay (Hrsg.), *Science Observed. Perspectives on the Social Study of Science*. London: Sage, 1–18.
- Knuth, Donald E., 1968–1973: *The Art of Computer Programming I-III*. Reading, MA: Addison-Wesley.

- , 1973: Computer, Science and Mathematics. How a New Discipline Presently Interacts With an Old One, and What We May Expect in the Future. In: *American Scientist* 61, 707–713.
- Knuth, Donald E./Luis Trabb Pardo, 1980: The Early Development of Programming Languages. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 197–274.
- Kock, Gerd/Gerhard Goos, 1990: Stichwort ALGOL 60, 68. In: Fritz Krückeberg/Otto Spaniol (Hrsg.), *Lexikon Informatik und Kommunikationstechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 9.
- Kosko, Bart, 1993: *Fuzzy-logisch. Eine neue Art des Denkens*. Hamburg: Carlsen.
- Krämer, Sybille, 1988: *Symbolische Maschinen. Die Idee der Formalisierung in geschichtlichem Abriss*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- (Hrsg.), 1994: *Geist, Gehirn, Künstliche Intelligenz: Zeitgenössische Modelle des Denkens. Ringvorlesung an der Freien Universität Berlin*. Berlin: de Gruyter.
- Krohn, Wolfgang, 1989: Finalisierung der Wissenschaft – Retrospektive und Perspektive. In: *Arbeitsblätter zur Wissenschaftsgeschichte* 22, 9–32.
- Krohn, Wolfgang/Günter Küppers, 1989: Rekursives Durcheinander. Wissenschaftsphilosophische Überlegungen. In: *Kursbuch* Heft 98, 69–81.
- , 1990a: Wissenschaft als selbstorganisierendes System. Eine neue Sicht alter Probleme. In: Wolfgang Krohn/Günter Küppers (Hrsg.), *Selbstorganisation. Aspekte einer wissenschaftlichen Revolution*. Braunschweig: Vieweg, 303–328.
- , 1990b: The Selforganization of Science. Outline of a Theoretical Model. In: Wolfgang Krohn et al. (Hrsg.), *Selforganization. Portrait of a Scientific Revolution*. Dordrecht: Kluwer, 208–222.
- Krückeberg, Fritz, 1990: Stichwort Informatik. In: Fritz Krückeberg/Otto Spaniol (Hrsg.), *Lexikon Informatik und Kommunikationstechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 297–299.
- Kuhn, Thomas S., 1976: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 2. überarb. Auflage. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- , 1976: *Die Entstehung des Neuen. Studien zur Struktur der Wissenschaftsgeschichte*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Küppers, Günter, 1979: Fusionsforschung – Zur Zielorientierung im Bereich der Grundlagenforschung. In: Wolfgang van den Daele et al. (Hrsg.), *Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 287–328.
- Latour, Bruno, 1987: *Science in Action. How to Follow Scientists and Engineers Through Society*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Latour, Bruno/Steve Woolgar, 1979: *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts*. London: Sage.
- Laudan, Larry, 1977: *Progress and Its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Berkeley, CA: University of California Press.

- Lawrence, Paul R./Jay W. Lorsch, 1972: Differentiation and Integration in Complex Organizations. In: Koya Azumi/Jerald Hage (Hrsg.), *Organizational Systems. A Text-Reader in the Sociology of Organizations*. Lexington, MA: D.C. Heath, 334–357.
- Lehmer, Derrick H., 1980: A History of the Sieve Process. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 445–457.
- Lévy, Pierre, 1994: *Die Erfindung des Computers*. In: Michael Serres (Hrsg.), *Elemente einer Geschichte der Wissenschaften*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 905–945.
- Lodahl, Janice B./Gerald Gordon, 1972: The Structure of Scientific Fields and the Functioning of University Graduate Departments. In: *American Sociological Review* 37, 57–72.
- Luft, Alfred Lothar, 1988: *Informatik als Technikwissenschaft. Eine Orientierungshilfe für das Informatikstudium*. Mannheim: BI-Wissenschaftsverlag.
- , 1992: Wissen und Information bei einer Sichtweise der Informatik als Wissenstechnik. In: Wolfgang Coy (Hrsg.), *Sichtweisen der Informatik*. Braunschweig: Vieweg, 49–70.
- Luhmann, Niklas, 1970: Selbststeuerung der Wissenschaft. In: Niklas Luhmann, *Soziologische Aufklärung 1. Aufsätze zur Theorie sozialer Systeme*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 232–252.
- , 1986: *Ökologische Kommunikation. Kann die moderne Gesellschaft sich auf ökologische Gefährdungen einstellen?* Opladen: Westdeutscher Verlag.
- , 1990: *Die Wissenschaft der Gesellschaft*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Lummer, Otto, 1912: Physikalische Betrachtungen in der Natur. 2: Der Energievorrat in der Natur. In: *Natur* 3, 217–222.
- Lutterbeck, Ernst, 1975: Arbeitsprogramm zur Verbesserung des Informationswesens der Bundesregierung. In: Peter Hoschka/Uwe Kalbhen (Hrsg.), *Datenverarbeitung in der politischen Planung*. Frankfurt a.M.: Campus, 17–26.
- Lüthe, Friedrich, 1988: Ist Cobol wirklich ein alter Hut? In: *Topix* 9/1988.
- Lynch, Michael/Eric Livingston/Harold Garfinkel, 1983: Temporal Order in Laboratory Work. In: Karin Knorr-Cetina/Michael J. Mulkay (Hrsg.), *Science Observed. Perspectives on the Social Study of Science*. London: Sage, 205–238.
- Mahoney, Michael S., 1988: The History of Computing in the History of Technology. In: *Annals in the History of Computing* 10, 113–125.
- , 1992: Computers and Mathematics: The Search for a Discipline of Computer Science. In: Javier Echeverria et al. (Hrsg.), *The Space of Mathematics. Philosophical, Epistemological, and Historical Explorations*. Berlin: Springer, 349–363.
- Mahr, Bernd, 1984: Die Herrschaft der Gebrauchsanweisung. In: *Kursbuch* Heft 75, 89–108.
- , 1989: Informatik. Wachstumsstörungen eines Wunderkinds. In: *Kursbuch* Heft 97, 55–70.

- Mainzer, Klaus, 1979: Entwicklungsfaktoren der Informatik in der Bundesrepublik Deutschland. In: Wolfgang van den Daele et al. (Hrsg.), *Geplante Forschung. Vergleichende Studien über den Einfluß politischer Programme auf die Wissenschaftsentwicklung*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 117–180.
- , 1994: *Computer – Neue Flügel des Geistes? Die Evolution computergestützter Technik, Wissenschaft, Kultur und Philosophie*. Berlin: de Gruyter.
- Malsch, Thomas, 1991: Expertensysteme in der Krise. Kinderkrankheiten oder frühzeitige Vergreisung. In: *KI 5*, 70–74.
- , 1995: Problembegriff und ›problem solving‹: Ein Essay über künstliche Intelligenz und Wissensgenese. In: Werner Rammert (Hrsg.), *Soziologie und Künstliche Intelligenz. Produkte und Probleme einer Hochtechnologie*. Frankfurt a.M.: Campus, 133–160.
- Mambrey, Peter/Michael Pateau/August Tepper, 1995: *Technikentwicklung durch Leitbilder. Neue Steuerungs- und Bewertungsinstrumente*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Mannheim, Karl, 1985 [1929]: *Ideologie und Utopie*. Frankfurt a.M.: Klostermann.
- Marth, Willy 1992: *Der schnelle Brüter SNR 300 im Auf und Ab seiner Geschichte*. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- Martin, Tomas, 1977: Die Förderung von PEARL im Projekt ›Prozeßlenkung mit Datenverarbeitungsanlagen‹ des 2. und 3. DV-Programms der Bundesregierung. In: *Regelungstechnik 25*, 2–8.
- Masterman, Margaret, 1970: The Nature of a Paradigm. In: Imre Lakatos/Alan Musgrave (Hrsg.), *Criticism and the Growth of Knowledge*. Proceedings of the International Colloquium in the Philosophy of Science, London 1965, Vol. 4. Cambridge: Cambridge University Press, 59–90.
- Mauchly, John W., 1948: Preparation of Problems for EDVAC-Type Machines. In: *Annals of the Computation Laboratory of Harvard University*, Vol. 16. Cambridge, MA: Cambridge University Press. (Lecture given at the Symposium on Large Scale Digital Calculating Machinery, 7–10 January 1947.)
- , 1980: The ENIAC. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 541–550.
- Mayntz, Renate, 1985: *Forschungsmanagement. Steuerungsversuche zwischen Scylla und Charybdis*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Mayntz, Renate/Fritz W. Scharpf, 1975: *Policy-Making in the German Federal Bureaucracy*. Amsterdam: Elsevier.
- McCorduck, Pamela, 1987: *Denkmaschinen. Die Geschichte der Künstlichen Intelligenz*. Haar bei München: Markt- und Technik-Verlag.
- , 1988: Artificial Intelligence. An Aperçu. In: Stephen R. Graubard (Hrsg.), *The Artificial Intelligence Debate. False Starts, Real Foundations*. Cambridge, MA: MIT Press, 65–84.

- McCulloch, Warren S./Walter H. Pitts, 1943: A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, 115–133.
- McLuhan, Marshall, 1975: *Understanding Media: The Extensions of Man*. 5. Auflage. London: Routledge & Kegan Paul.
- McNeill, Daniel/Paul Freiberger, 1994: *Fuzzy Logic. Die unscharfe Logik erobert die Technik*. München: Droemer Knaur.
- Medawar, Peter, 1963: Is the Scientific Paper a Fraud? In: *The Listener* 12, 377–378.
- Meitner, Lise, 1963: Wege und Irrwege zur Kernenergie. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau* 16, 167–169.
- Meitner, Lise/Otto Robert Frisch, 1979 [1939]: Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction. In: Horst Wohlfarth (Hrsg.), *40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 97–100.
- Merton, Robert K. 1970 [1938]: *Science, Technology, and the Society in Seventeenth-Century England*. New York: Howard Fertig.
- , 1957: *Social Theory and Social Structure*. Überarb. u. erw. Auflage. Glencoe, IL: Free Press.
- , 1985: Der Matthäus-Effekt in der Wissenschaft. In: Robert K. Merton, *Entwicklung und Wandel von Forschungsinteressen*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp, 100–116.
- Metropolis, Nicholas C., 1980: The MANIAC. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 457–464.
- Meusel, Hans-Joachim, 1982: *Grundprobleme des Rechts der außeruniversitären ›staatlichen‹ Forschung*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Michaelis, Hans (Hrsg.), 1986: *Handbuch der Kernenergie. Compendium der Energiewirtschaft und Energiepolitik*. 2 Bände. Düsseldorf: Econ.
- Minsky, Marvin L., 1968: *Semantic Information Processing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Minsky, Marvin L./Seymour A. Papert, 1969: *Perceptrons. An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Mintzberg, Henry, 1979: *The Structuring of Organizations. A Synthesis of the Research*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Müller, Wolfgang D., 1990: *Geschichte der Kernenergie in der Bundesrepublik Deutschland. Anfänge und Weichenstellungen*. Stuttgart: Schäffer.
- Mullins, Nicholas C., 1973: *Science: Some Sociological Perspectives*. Indianapolis, IN: Bobbs & Merrill.
- Mulkay, Michael J., 1972: *The Social Process of Innovation. A Study in the Sociology of Science*. London: Macmillan Press.
- , Drei Modelle der Wissenschaftsentwicklung. In: Nico Stehr/René König (Hrsg.), *Wissenschaftssoziologie. Studien und Materialien*. Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie, Sonderheft 18, 48–61.

- , 1980: Sociology of Science in the West. In: *Current Sociology* 28, 1–184.
- , 1985: *The Word and the World: Explorations in the Form of Sociological Analysis*. London: Allen & Unwin.
- Neumann, Bernd, 1990: Künstliche Intelligenz. In: Fritz Krückeberg/Otto Spaniol (Hrsg.), *Lexikon Informatik und Kommunikationstechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 339–340.
- Neumann, John von, 1982 [1945]: First Draft of a Report on the EDVAC. In: Brian Randell (Hrsg.), *The Origins of Digital Computers*. Berlin: Springer, 383–392.
- , 1960: *Die Rechenmaschine und das Gehirn*. München: Oldenbourg.
- Neumann, John von/Oskar Morgenstern, 1961: *Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten*. Würzburg: Physika-Verlag.
- Newell, Allen/Alan J. Perlis/Herbert A. Simon, 1967: Letter to the Editors of Science. In: *Science* 157, 1373–1374.
- Noble, David F., 1984: *Forces of Production: A Social History of Industrial Automation*. New York: Knopf.
- Noddack, Ida, 1979 [1934]: Über das Element 93. In: Horst Wohlfarth (Hrsg.), *40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 60–64.
- Nygaard, Kristen, 1986: Program Development as a Social Activity. In: *Information Processing* 86, 189–198.
- Overbeck, Helmut, 1992: *Der Schnelle Brüter in Kalkar. Planung, Bau, vorkernreale Inbetriebnahme, Stilllegung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Parnas, David Lorge, 1990: Education for Computing Professionals. In: *IEEE Computers* 23, 17–22.
- Parsons, Talcott, 1990: Prolegomena to a Theory of Social Institutions. In: *American Sociological Review* 55, 319–333.
- Partridge, Derek, 1986: Will AI Lead to a Super Software Crisis? In: Karamjit S. Gill (Hrsg.), *Artificial Intelligence for Society*. Chichester: Wiley.
- Pateau, Michael, 1990: *Mensch-Maschine-Kommunikation. Software, Gestaltungspotentiale, Sozialverträglichkeit*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Peierls, Rudolf, 1979: The Development of Our Ideas on the Nuclear Forces. In: Roger H. Stuewer (Hrsg.), *Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis, MI: University of Minnesota Press, 179–212.
- Perrow, Charles, 1970: *Organizational Analysis: A Sociological View*. London: Tavistock.
- Petri, Carl Adam, 1962: *Kommunikation mit Automaten*. Schriften des rheinisch-westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik.
- Petzold, Hartmut, 1985: *Rechnende Maschinen. Eine historische Untersuchung ihrer Herstellung und Anwendung vom Kaiserreich bis zur Bundesrepublik*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Pflüger, Jörg, 1994: Informatik auf der Mauer. In: *Informatik Spektrum* 17, 251–257.

- Pickering, Andrew, 1984: *Constructing Quarks: A Sociological History of Particle Physics*. Chicago, IL: University of Chicago Press/Edinburgh: Edinburgh University Press.
- , 1989: Living in the Material World: On Realism and Experimental Practice. In: David Gooding et al. (Hrsg.), *The Uses of Experiment: Studies in the Natural Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press, 275–297.
- (Hrsg.), 1992: *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Pickering, Andrew/Adam Stephanides, 1992: Constructing Quarternions: On the Analysis of Conceptual Practice. In: Andrew Pickering (Hrsg.), *Science as Practice and Culture*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 139–167.
- Pinch, Trevor B./Wiebe E. Bijker, 1987: The Social Construction of Facts and Artefacts: Or How the Sociology of Science and Sociology of Technology Might Benefit Each Other. In: Wiebe E. Bijker et al. (Hrsg.), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology*. Cambridge, MA: MIT Press, 17–50.
- Polanyi, Michael, 1962: The Republic of Science. In: *Minerva* 1, 54–73.
- Popper, Karl R., 1986 [1935]: *Logik der Forschung*. Tübingen: Mohr.
- Price, Derek J. de Solla, 1965: Is Technology Historically Independent of Science? A Study in Statistical Historiography. In: *Technology and Culture*, 553–568.
- Pugh, Emerson W./Lyle R. Johnson/John H. Palmer, 1991: *IBM's 360 and Early 370 Systems*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Puppe, Frank, 1988: *Einführung in Expertensysteme*. Berlin: Springer.
- , 1990: *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*. Berlin: Springer.
- Queisser, Hans-Joachim, 1987: *Kristallene Krisen. Mikroelektronik – Wege der Forschung, Kampf um Märkte*. München: Piper.
- Queisser, Hans-Joachim et al., 1985: *Informationstechnik: Förderung der institutionellen Forschung und Entwicklung. Bericht der Queisser-Kommission an das Bundesministerium für Forschung und Technologie*. Bonn: Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT).
- Radkau, Joachim, 1983: *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1975. Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- , 1984: Die Geschichte der Kernenergie. In: Joachim Varchmin/Joachim Radkau, *Kraft, Energie und Arbeit. Energie und Gesellschaft*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 170–316.
- Rammert, Werner, 1995: Computerwelten: Vollendung der Moderne oder Epochenbruch zur Postmoderne? In: *Soziologische Revue* 18, 19–26.
- Randell, Brian, 1980: The COLOSSUS. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 47–92.

- Ravetz, Jerome R., 1973: *Die Krise der Wissenschaft. Probleme der industrialisierten Forschung*. Neuwied: Luchterhand.
- Rechenberg, Peter, 1991: *Was ist Informatik? Eine allgemeinverständliche Einführung*. München: Hanser.
- Renneberg, Monika, 1995: *Gründung und Aufbau des GKSS-Forschungszentrums Geesthacht*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Rhodes, Richard, 1990: *Die Atombombe oder die Geschichte des 8. Schöpfungstages*. Berlin: Verlag Volk und Welt.
- Rip, Arie, 1982: The Development of Restrictedness in the Sciences. In: Norbert Elias et al. (Hrsg.), *Scientific Establishments and Hierarchies. Sociology of the Sciences, Yearbook 6*. Dordrecht: Reidel, 219–238.
- , 1992: Science and Technology as Dancing Partners. In: Peter Kroes/Martijn Bakker (Hrsg.), *Technological Development and Science in the Industrial Age. New Perspectives on the Science-Technology Relationship*. Dordrecht: Kluwer, 231–270.
- Robertson, James E., 1980: The ORDVAC and the ILLIAC. In: Nicholas C. Metropolitan et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 347–364.
- Rosenberg, Nathan/Richard R. Nelson, 1994: American Universities and Technical Advance in Industry. In: *Research Policy* 23, 323–348.
- Rosenblatt, Frank, 1958: The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage in the Brain. In: *Psychological Review* 65, 386–408.
- Roszak, Thomas, 1986: *Der Verlust des Denkens. Über die Mythen des Computer-Zeitalters*. München: Droemer-Knaur.
- Rudwick, Martin J. S., 1985: *The Great Devonian Controversy: The Shaping of Scientific Knowledge among Gentlemanly Specialists*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Rumelhardt, David E./James L. McClelland, 1986: *Parallel Distributed Computing*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Salus, Peter H., 1995: *Casting the Net. From ARPANET to INTERNET and Beyond*. Reading, MA: Addison-Wesley Longman.
- Sammet, Jean E., 1969: *Programming Languages: History and Fundamentals*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Schank, Roger C., 1991: Where's the AI? In: *AI Magazine* (Winter Issue), 2849.
- Schank, Roger C./Peter G. Childers, 1986: *Die Zukunft der Künstlichen Intelligenz: Chancen und Risiken*. Köln: DuMont.
- Scharpf, Fritz W., 1993: Versuch über Demokratie im verhandelnden Staat. In: Roland Czada/Manfred G. Schmidt (Hrsg.), *Verhandlungsdemokratie, Interessenvermittlung, Regierbarkeit. Festschrift für Gerhard Lehmbruch*. Opladen: Westdeutscher Verlag, 25–50.
- Schatz, Heribert, 1973: Auf der Suche nach neuen Problemlösungsstrategien. In: Renate Mayntz/Fritz W. Scharpf (Hrsg.), *Planungsorganisation. Die Diskussion um die Reform von Regierung und Verwaltung*. München: Piper.

- Schimank, Uwe, 1995a: Für eine Erneuerung der institutionalistischen Wissenschaftssoziologie. In: *Zeitschrift für Soziologie* 24, 42–57.
- , 1995b: ›Nimm zwei!‹ Eine Replik auf Klaus Amann. In: *Zeitschrift für Soziologie* 24, 159–160.
- Schmidt, Susanne K./Raymund Werle, 1994: Koordination und Evolution: Technische Standards im Prozeß der Entwicklung technischer Systeme. In: Gotthard Bechmann/Werner Rammert (Hrsg.), *Technik und Gesellschaft, Jahrbuch 7*. Frankfurt a.M.: Campus, 95–126.
- , 1995: Die Entwicklung von Kompatibilitätsstandards in der Telekommunikation. In: *Homo Oeconomicus* 11, 419–448.
- , 1998: *Coordinating Technology. Studies in the International Standardization of Telecommunications*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Schopman, Joop, 1987: Frames of Artificial Intelligence. In: Brian P. Bloomfield (Hrsg.), *The Question of Artificial Intelligence: Philosophical and Sociological Perspectives*. London: Croom Helm.
- Searle, John R., 1990: Is the Brain's Mind a Computer Program? In: *Scientific American* 262, 26–31.
- Seegmüller, Gerhard, 1991: Zur Entwicklung der Rechentechnik. In: Manfred Broy (Hrsg.), *Informatik und Mathematik*. Berlin: Springer, 312–319.
- Segrè, Emilio, 1955: Fermi and Neutron Physics. In: *Reviews of Modern Physics* 27, 257–263.
- Servan-Schreiber, Jean-Jaques, 1968: *Die amerikanische Herausforderung*. Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Simon, Herbert A., 1976 [1945]: *Administrative Behavior. A Study of Decision-Making Processes in Administrative Organization*. New York: Free Press.
- , 1981: *The Sciences of the Artificial*. 2. Auflage. Cambridge, MA: MIT Press.
- Sirbu, Marvin A./Laurence E. Zwimpfer, 1985: Standards Setting for Computer Communications: The Case of X.25. In: *IEEE Communications Magazine* 23 (3), 35–45.
- Slutz, Ralf J., 1980: Memories of the Bureau of Standards. SEAC. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 471–478.
- Sohn-Rethel, Alfred, 1971: *Warenform und Denkform*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Sorge, Arndt, 1985: *Informationstechnik und Arbeit im sozialen Prozeß. Arbeitsorganisation, Qualifikation und Produktivkraftentwicklung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Spillner, Andreas, 1994: Kann eine Krise 25 Jahre dauern? In: *Informatik Spektrum* 17, 48–52.
- Star, Susan L., 1983: Simplification in Scientific Work: An Example from Neuroscience Research. In: *Social Studies of Science* 13, 205–228.
- , 1985: Scientific Work and Uncertainty. In: *Social Studies of Science* 15, 391–427.
- , 1986: Triangulating Clinical and Basic Research: British Localizationists, 1870–1906. In: *History of Science* 24, 29–48.

- , 1989: *Regions of the Mind: Brain Research and the Quest for Scientific Certainty*. Stanford, CA: Stanford University Press.
- Star, Susan, L./James R. Griesemer, 1989: Institutional Ecology, ›Translations‹, and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907–39. In: *Social Studies of Science* 19, 387–420.
- Stibitz, George R., 1980: Early Computers. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 479–484.
- Stucke, Andreas, 1993: *Institutionalisierung der Forschungspolitik. Entstehung, Entwicklung und Steuerungsprobleme des Bundesforschungsministeriums*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Tarján, Rudolf, 1962: Logische Maschinen. In: Walter Hoffmann (Hrsg.), *Digitale Informationswandler. Probleme der Informationsverarbeitung in ausgewählten Beiträgen*. Braunschweig: Vieweg, 110–159.
- Teubner, Gunter/Helmut Willke, 1984: Kontext und Autonomie. Gesellschaftliche Selbststeuerung durch reflexives Recht. In: *Zeitschrift für Rechtssoziologie* 5, 4–35.
- Thompson, James D., 1967: *Organizations in Action. Social Science Bases of Administrative Theory*. New York: McGraw-Hill.
- Turing, Alan M. 1987a [1937]: Über berechenbare Zahlen mit einer Anwendung auf das Entscheidungsproblem. In: Alan M. Turing, *Intelligence Service*, Schriften hrsg. von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler. Berlin, 1987: Brinkmann & Bose, 19–60.
- , 1987b [1947]: The State of the Art. Vortrag vor der Londoner Mathematical Society am 20. Februar 1947. In: Alan M. Turing, *Intelligence Service*. Schriften hrsg. von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler. Berlin: Brinkmann & Bose, 185–207.
- , 1987c [1950]: Rechenmaschinen und Intelligenz. In: Alan M. Turing, *Intelligence Service*. Schriften hrsg. von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler. Berlin: Brinkmann & Bose, 149–182.
- , 1987: *Intelligence Service*. Schriften hrsg. von Bernhard Dotzler und Friedrich Kittler. Berlin: Brinkmann & Bose.
- Turkle, Sherry, 1984: *The Second Self: Computers and the Human Spirit*. New York: Simon & Schuster.
- Ulam, Stanislaw M., 1980: Von Neumann: The Interaction of Mathematics and Computing. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 93–100.
- Voelzkow, Helmut, 1996: *Private Regierungen in der Techniksteuerung. Eine sozialwissenschaftliche Analyse der technischen Normung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Vorndran, Edgar P., 1986: *Entwicklungsgeschichte des Computers*. 2. überarb. Auflage. Berlin: VDE-Verlag.
- Weizenbaum, Joseph, 1978: *Die Macht der Computer und die Ohnmacht der Vernunft*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.

- Weizsäcker, Carl Friedrich von, 1937: *Die Atomkerne. Grundlagen und Anwendungen ihrer Theorie*. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.
- Wells, Mark B., 1980: Reflections on the Evolution of Algorithmic Language. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 275–290.
- Wheeler, John A., 1979: Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics: The Interplay of Colleagues and Motivations. In: Roger H. Stuewer (Hrsg.), *Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s*. Minneapolis, MI: University of Minnesota Press, 213–324.
- Whitley, Richard, 1972a: Black Boxism and the Sociology of Science. In: *Sociological Review* 18, 61–92.
- , 1972b: The Establishment and Structure of the Sciences as Reputational Organizations. In: Norbert Elias et al. (Hrsg.), *Scientific Establishments and Hierarchies*. Dordrecht: Reidel, 313–357.
- , 1974a: Introduction. In: Richard Whitley (Hrsg.), *Social Processes of Scientific Development*. London: Routledge & Kegan Paul, 1–10.
- , 1974b: Cognitive and Social Institutionalization of Scientific Specialities and Research Areas. In: Richard Whitley (Hrsg.), *Social Processes of Scientific Development*. London: Routledge & Kegan Paul, 69–95.
- , 1984: *The Intellectual and Social Organization of the Sciences*. Oxford: Clarendon Press.
- Wiegand, Josef, 1994: *Informatik und Großforschung. Geschichte der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung*. Frankfurt a.M.: Campus.
- Wiener, Lauren Ruth, 1994: *Digitales Verhängnis. Gefahren der Abhängigkeit von Computern und Programmen*. Bonn: Addison-Wesley.
- Wiener, Norbert, 1952: *Mensch und Menschmaschine. Kybernetik und Gesellschaft*. Frankfurt a.M.: Metzner.
- Wiener, Oswald, 1984: Turings Test. Vom dialektischen zum binären Denken. In: *Kursbuch* Heft 75, 12–37.
- Wilkes, Maurice V., 1980: Early Programming Developments in Cambridge. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 497–504.
- Willke, Helmut, 1983: *Entzauberung des Staates. Überlegungen zu einer soziologischen Steuerungstheorie*. Königstein/Ts.: Athenäum.
- Winkelhage, Friedrich, 1988: Stationen einer Großforschungseinrichtung. 20 Jahre GMD. In: *GMD-Spiegel* 1988/2–3, 36–40. Sankt Augustin.
- Winograd, Terry/Fernando Flores, 1986: *Understanding Computers and Cognition. A New Foundation for Design*. Norwood, NY: Ablex Publ.
- Wirth, Niklaus, 1983: *Algorithmen und Datenstrukturen*. Stuttgart: Teubner.
- , o.J.: Recollections about the Development of Pascal. Manuskript. Zürich.
- Wohlfarth, Horst, 1979: Einleitung. In: Horst Wohlfarth (Hrsg.), *40 Jahre Kernspaltung. Eine Einführung in die Originalliteratur*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1–54.

- Woodward, Joan, 1965: *Industrial Organization: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Woolgar, Steve, 1988: Time and Documents in Researcher Interaction: Some Ways of Making Out What Is Happening in Experimental Science. In: Michael Lynch (Hrsg.), *Representation in Scientific Practice*. Dordrecht: Kluwer, 171–200.
- Zemanek, Heinz, 1962: Automaten und Denkprozesse. In: Walter Hoffmann (Hrsg.), *Digitale Informationswandler. Probleme der Informationsverarbeitung in ausgewählten Beiträgen*. Braunschweig: Vieweg, 1–66.
- , 1980: Central European Prehistory of Computing. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 587–610.
- , 1991: Geschichte der Schaltalgebra. In: Manfred Broy (Hrsg.), *Informatik und Mathematik*. Berlin: Springer, 43–72.
- Zimmermann, Hans-Jürgen, 1994: Vorwort. In: Daniel McNeill/Paul Freiberger, *Fuzzy Logic. Die »unscharfe« Logik erobert die Technik*. München: Droemer Knaur, 7–11.
- Zuckermann, Harriet, 1988: The Sociology of Science. In: Neil J. Smelser (Hrsg.), *Handbook of Sociology*. Newbury Park: Sage, 511–574.
- Zuckermann, Harriet/Robert K. Merton, 1971: Patterns of Evaluation in Science: Institutionalization, Structure and Functions of the Referee System. In: *Minerva* 9, 66–100.
- , 1973: Age, Aging and Age Structure in Science. In: Robert K. Merton, *The Sociology of Science*. Edited by Norman Storer. Chicago, IL: University of Chicago Press, 497–559.
- Zuse, Konrad, 1970: *Der Computer. Mein Lebenswerk*. München: Verlag moderne Industrie.
- , 1980: Some Remarks on the History of Computing. In: Nicholas C. Metropolis et al. (Hrsg.), *A History of Computing in the Twentieth Century. A Collection of Essays*. New York: Academic Press, 611–628.

Sach- und Personenregister

- ADA 278
 - Scheitern 233
 - Ziele 233
- Adhocracy, als Form der Forschungsorganisation 56, 62, 313
- Adressierung
 - absolute 138
 - relative 138
- Aiken, Howard 150
- Algebra
 - Boolesche 141–142
 - Schaltalgebra 142
- ALGOL 179, 182, 184
 - Aufstieg 186–87
 - ALGOL Committee der Benutzerorganisation SHARE (*s. auch* SHARE) 206, 209, 210, 211
 - Drama 204–213
 - Niedergang 211
 - ALGOL-58 186, 205
 - ALGOL-60 208
 - ALGOL-68 213
 - ALGOL-W 212
 - ALGOL-X 213
 - ALGOL-Y 212
- Alpha-Tunnel-Effekt (*s. auch* Gamow, George) 73, 80
- Analytical engine 136
- Anti-AKW-Bewegung 126
- ARPANET 279, 281
- Assistenz-Computer 292
- Association for Computing Machinery (ACM) 181
 - Curriculum-68 192, 268
 - Rolle im ALGOL-Drama 204–214
- Atomic Energy Commission (AEC) 95
- Atomkern 70
 - Bohr-Wheelersches Modell 66, 86–87
 - Tröpfchenmodell 65, 73, 81 85–89
 - Schalenmodell 71
- Atommodell
 - Bohr-Sommerfeldsches 72
 - Rutherfordsches 70–71
- Atompolitik der Bundesländer 102
- Atomprogramm der Bundesregierung
 - Stagnation 104
 - Ziele 101
- Atoms-for-Peace-Programm der amerikanischen Regierung 96, 106
- Aufgabenungewißheit und Aufgabeninterdependenz des Forschungshandelns 28, 55–57, 312–313
 - in der Kernphysik und Kerntechnik 30, 60, 65–68, 93–94, 313–315
 - in der kerntechnischen Großforschung 30, 60, 68–69, 113–119, 124–125, 315–316
 - in der Informatik und Informationstechnik 30–31, 61, 135–136, 195–

- 199, 202–204, 218–222, 228–233, 238–240, 251–258, 316–319
 – in der informationstechnischen Großforschung 31, 62, 259–261, 318–321
- B.I.T.S. (Bonn Interaktive Terminal System) 270, 276–277
- Babbage, Charles 132, 136–139
- Babylon 288–289
- Backus, John 180, 188, 191, 207
- Bandwagoneffekte *siehe* Lock-in-Effekte
- Battle of the Sexes (*s. auch* Kampf der Geschlechter) 200
- Bauer, Friedrich L. 186, 187–188, 260
- Becquerel, Antoine Henri 69
- Bielefelder Studien zur »Geplanten Forschung« 17, 18, 20–23, 25, 30, 39, 311, 312
- Bohr, Niels 72, 75, 79, 81, 85–87
- Bounded rationality des Forschungshandelns (*s. auch* Rationalität des Forschungshandelns) 25, 32, 48–50, 315, 323
- Brutreaktor 67, 89, 95–96, 111
- Bruttechnologie 86, 89, 95
- Bundesdatenbank 271
 – Scheitern 272–273
 – Ziele 272
- Bundesministerium des Innern (BMI) 98
- Bundesministerium für Atomenergie (BMAt) 100, 102, 110, 111
- Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft (BMBW) 125, 271
- Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) 125, 129, 271–274, 277, 283, 285, 287, 294
- Bundesministerium für wissenschaftliche Forschung (BMwF) 111–112, 119, 263, 265, 268–271
- C 196, 282
 – Entwicklung 235–236
 – Lock-in 236–237
- Chadwick, James 76–79
- Churchsche These (*s. auch* Allgemeine Rekursion) 145
- COBOL 196, 238
 – Lock-in 217
- Cognitive science 309
- Collins, Harry M. 41, 45, 47
- Colossus 146–147
- Computer
 – als abstrakte Maschine 198
 – als Gegenstand der Elektronik 219–223, 317
 – als Moving target der Informatik 228–233
 – als Universalrechner 138, 154–155
 – Entdeckung 153–155
 – Von-Neumann-Architektur 133, 134, 136, 139, 148, 149, 184, 185
- Computer science 161, 165, 309
 – als experimentell-empirische Wissenschaft 170
 – als formale Strukturwissenschaft 170, 189–193
 – in den USA 182
 – in der Schweiz 182
 – in Deutschland 183–184
 – als Wissenschaft von der organisierten Komplexität 190
 – als »Geistes-Ingenieurwissenschaft« 192
- Computergenerationen (*s. auch* Koevolution der Softwaretechnik und Elektronik) 221–222

- Computerindustrie
 – in Deutschland 183
 – in den USA 172, 182
 – Wandel in den siebziger Jahren
 222–224
- Consultative Committee for Telephone
 and Telegraph (CCITT) 198, 280,
 281
- Curie, Marie 69, 75
 Curie, Pierre 69, 75
- Dampfbrüter (s. *auch* Reaktortypen)
 – Konflikt um 118–119
- Datenfernverarbeitung
 – leitungvermittelte 279
 – paketvermittelte 279
- Datenverarbeitungs-Programme der
 Bundesregierung 193, 267
- Department of Defense (DoD) 171, 172,
 215, 218, 233, 234, 235, 278, 281
- Deutsche Atomkommission (DATK)
 100, 103, 110, 122, 125, 315
- Deutsche Forschungsgemeinschaft
 (DFG) 98, 99, 183
- Deutscher Forschungsrat (DFR) 96–98
- Deutsches Institut für Normung (DIN)
 198, 278
- Deutsches Rechenzentrum Darmstadt
 (DRZ) 264
- Dijkstra, Edsger W. 190, 191, 196, 230,
 253, 254, 256, 257
- Eckert, Presper J. 151, 153, 154–155,
 158–159
- EDVAC (Electronic Discrete Variable
 Arithmetic Computer) 132–133,
 153–156, 158–160, 166
- Einheitsbausteinrechner (EBR) 282–283
- Elan 282
- Eltviller-Programm 101, 103, 122
- Energieversorgungsunternehmen (EVU)
 104
 – Rolle in der deutschen Atompolitik
 106–107
- ENIAC (Electronic Numeric Integrator
 and Calculator) 151–153, 155
- Enigma 146
- Eumel 282
- Expertensystemtechnik 169, 203, 287,
 288, 302
 – Grenzen 243, 246
 – Probleme der Wissensakquisition
 244
 – wirtschaftliche Erfolge 245
 – Ziele 243
- Fermi, Enrico 78–82, 85
- Fermi-Reaktor in Chicago 87–88
- Fifth Generation Programme der japani-
 schen Regierung 242, 287, 290
- Finalisierung der Wissenschaft 22, 38
- Forschungsreaktoren in Deutschland
 nach dem Zweiten Weltkrieg 102
- Forschungsverbot, kerntechnisches der
 Alliierten 99
- FORTRAN 180, 196, 204, 238
 – Lock-in 208–216
- Fraunhofer-Gesellschaft (FhG) 32
 – Modell der Vertragsforschung 293
 – organisatorische Identität 293–294
- Fraunhofer-Institute (FhI)
 – als autonome Profitcenters 294
 – in der Informationstechnik 295
- Frisch, Otto Robert 83, 84, 87
- Fuzzy logic 248, 290
- Fuzzy-Initiative NRW 290
- Gamow, George 73–74, 80–83
- Garbage-can-Modell der Organisation
 55, 319

- General Electric 104–109, 111, 119, 159, 172
- Genfer Atomkonferenz von 1955 99–101, 104
- Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GaMM) 165, 181, 185–186, 211, 268–269
- Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung (GMD) 21
- 1. Reform 263–270
 - 2. Reform 285–287
 - 3. Reform 287–288
 - 4. Reform 292–293
 - Rolle der Grundlagenforschung in der 261, 267–268, 283–284, 292–293
 - Gründungsphase 263–270
 - KI-Forschung in der 286–290
 - Matrixorganisation 286
 - Projektstruktur 270–284, 286–287
 - Schichtenmodell 286
 - Unternehmensmodell 274
 - Verbundforschung der GMD 285
- GMD-Netz 279, 282
- Lock-out 281
 - Ziele 280
- Großforschung
- als forschungsorganisatorisches Modell 18–20, 27, 53–54
 - als Hausmacht der Forschungspolitik des Bundes 19, 111–112, 123, 304
 - misfit bzw. mismatch mit den kognitiven Bedingungen des Forschungsfeldes 21, 259–261, 319–321
- Hacking, Ian 43, 50, 311
- Häfele, Wolf 97, 110, 114, 115, 118, 124
- Hahn, Otto 66, 80, 81–84, 314
- Heisenberg, Werner 65, 72, 77–79, 87, 90, 96, 97, 99, 103, 110
- Hilbert-Programm 142, 143–145
- Hoare C.A.R. 178, 188, 190, 191, 196, 234, 257
- Hoare-logic 191
- Hochenergiephysik *siehe* Partikelphysik
- IITB 304
- Entwicklungsgeschichte 297
 - Forschungsfelder 299
 - Forschungsorganisation 299
 - Haushaltsentwicklung 297
- Informatik
- als formale Strukturwissenschaft von den Algorithmen 170, 152, 256, 316
 - als formale und empirisch-hermeneutische Disziplin 203, 246, 251–258
 - als fragmentierte Adhocracy 251
 - als Geistes-Ingenieurwissenschaft 192
 - als Normalwissenschaft 198, 218–219
 - curricularer Konflikt 253
 - Curriculum 192
 - Diversifikation 252
 - Etablierung als eigenständige Disziplin 269
 - formalistische Schule 190, 254, 319
 - Identitätsprobleme 252
 - intuitionistische Schule 254, 319
 - Rückschläge 228
 - Wissenskorporus 231
- Institut für Instrumentelle Mathematik (IIM) 120, 264–269, 266
- Institute for Advanced Studies (IAS) 158
- Computer des 156, 159, 160, 163

- institutionelle Einflußfaktoren auf die wissenschaftliche Entwicklung
siehe kognitive und institutionelle Einflußfaktoren
- Integrierte Bürokratie als forschungsorganisatorisches Modell 56, 57, 313
- International Bureau Machines Corporation (IBM)
- Deutschland 292
 - Europe 206
 - FORTRAN I der 180–181
 - FORTRAN II-V der 214, 216–217
 - frühe programmierbare Rechner 140, 150, 151
 - Programming Language One (PL/I) 216–217
 - Rolle im ALGOL-Drama 205, 210–211
 - Rolle in der frühen Computerindustrie 159, 172–174, 180–181
 - System 360 214–216
 - System 650 160
 - System 701 158–160
 - World Trade 206
- International Federation for Information Processing
- ALGOL-Komitee 212–213
 - Entstehung 182, 187
- Jacquardmaschine 137
- Kampf der Geschlechter 200
- als Koordinationsspiel 201
 - als Nullsummenspiel 201
 - als Package deal 201
- Kellermaschine 184
- Kernforschungsanlage Jülich (KfA) 20, 33, 119
- Aufstieg zur Großforschungseinrichtung des Bundes 222–224
 - Entstehung 98, 120
 - Entwicklung des THTR 124–125
- Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) 20, 33, 98, 102, 108
- Aufstieg zur Großforschungseinrichtung des Bundes 108, 113–114
 - Entstehung 98, 102
 - Entwicklung des SNR-300 115–119
- Kernkraft
- Anwendungsmöglichkeiten 93–94
- Kernphysik
- als integrierte Bürokratie 28–29, 60, 312, 314
 - Entstehung 69–73
 - Probleme der theoretischen 74–78
 - Stagnation 73–75
 - Übergang zur Partikelphysik 78–79
- Kernspaltung
- als fehlgedeutetes Phänomen 79–81
 - als unerwartetes Phänomen 63–64
 - Anpassung der Theorie an das Phänomen der 83–86
 - Entdeckung der 81–83
- KI-Forschung
- harte, theoretische 165, 167–170, 242
 - weiche, praktische 240–246
- Knorr-Cetina, Karin 41, 42
- Knuth, Donald 189
- Koevolution der Softwaretechnik und Elektronik 219–221
- kognitive Einflußfaktoren auf die wissenschaftliche Entwicklung
siehe kognitive und institutionelle Einflußfaktoren
- kognitive Struktur der Wissenschaft
- als Grad paradigmatischer Reife 22, 36–37, 307–308

- als Grad der Standardisierung des Wissens 24–26, 50–52, 311–312
- als unabhängige und abhängige Variable 26, 54, 308–309
- kognitive und institutionelle Einflußfaktoren auf die Entwicklung der Wissenschaft 24, 26–28, 53–54, 305–306
- wechselseitige Stabilisierung 26, 52–55, 308–309
- kognitive Ungewißheit (s. auch Aufgabenungewißheit und Aufgabeninterdependenz des Forschungshandelns)
 - und beschränkte Rationalität des Forschungshandelns 24–25
 - und soziale Struktur wissenschaftlicher Felder 54–55, 60
 - Forschungshandeln als Reduktion von 25, 42
- kognitiver Stil des Forschungshandelns 53–54, 307
- Königssteiner Staatsvertrag 98–100, 263
- Konnektionismus *siehe* neuronale Netze
- Konstruktivismus 23–24, 40–45, 305–306, 310–311
- Kontextsteuerung 32, 33, 62, 204, 254, 262, 297
- Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung 19, 21, 161,
 - als Leitidee der Bielefelder Studien zur »Geplanten Forschung« 22, 36–39, 307–308
 - für die Computer science 131–133
 - für die Kernphysik 63
- Kybernetik 166–170
- Labor konstruktivismus (s. auch Konstruktivismus) 40–44, 305, 310
- Latour, Bruno 41–44, 310
- Leichtwasserreaktor (s. auch Reaktortypen)
 - in Oyster Creek 107, 111
 - in Shippingport 106, 109
 - Lock-in des 106–107
- Lighthill Report 242
- Lock-in-Effekte (s. auch technische Normen)
 - in der Informationstechnik 61, 67, 202, 217, 277 318
 - in der Kerntechnik 60, 104, 315, 318
- Logarithmenmanufaktur 137
- Logik
 - Entwicklung 140–143
 - Grenzen der zweiwertigen 178, 189, 248
 - intuitive 142
 - klassische 141
 - modale
 - nicht-monotone 178, 230
 - unscharfe 249
- Lovelace, Ada 138
- Manhattan Project 86–88
- Mannheim, Karl 34–35
- Massachusetts Institute of Technology (MIT) 172
- Mathematik
 - formalistisches Programm der Mathematik (s. auch Hilbert-Programm)
 - Scheitern 143–145
 - Ziele 142–143
 - Rolle in der Computer science 140–141, 179
- Mauchly, John W. 151–156, 158
- Max-Planck-Institut für Physik 97
- Meitner, Lise 82–85
- Mertonsche Wissenschaftssoziologie 48–49, 305–306
 - epistemologische Annahmen 22, 35

- Meteorologie 163
- Mikroelektronik (s. *auch* Koevolution der Softwaretechnik und Elektronik) 219, 222
- Mikroprogrammierung (s. *auch* Rechnerfamilie) 214–215
- Ministry for International Trade and Industry (MITI) 251, 282
- Mutual adjustment von Daten und Theorien *siehe* wechselseitige Anpassung von Daten und Theorien
- Nachrichtentechnische Gesellschaft (NTG) 268
- Nautilus 95
- Netzwerkexternalitäten (s. *auch* Lock-in-Effekte)
 - in der Informationstechnik 199, 202
- Neumann, John von 132, 154–158, 160–164
- neuronale Netze 246
 - Grenzen 247–248
 - Renaissance 247
- Neutron 77–81
 - Entdeckung des 76–77
- Neutronenökonomie *siehe* Reaktorphysik
- Neutronenphysik *siehe* Reaktorphysik
- Noddack, Eda 81–82
- Normung *siehe* technische Normen
- Normungsorganisationen, in der Informationstechnik 198
- Organisationssoziologie (s. *auch* Whitley-Schema)
 - wissenschaftlicher Felder 18, 26, 28–29, 52, 55, 198, 251, 312, 313, 319–322
- organische Profession, als Form der Forschungsorganisation 56–57
- parallele Datenverarbeitung (s. *auch* Petri-Netze) 177, 189
 - Anfänge 172
 - Probleme 227, 228, 230
- Pariser Verträge 99
- Partikelphysik 27, 64, 66, 90–92
 - Anfänge 78–79
 - idealistische Schule 79
 - substantialistische Schule 79
- Pascal 187, 196
 - praktische Bedeutung 237
 - Entstehung 213
- Pearl (Process Experiment Automation Realtime Language) 277–279
- Petri, Carl Adam 274, 283, 284
- Petri-Netze 189, 230, 266, 268, 277, 283
- Phasenmodell der wissenschaftlichen Entwicklung *siehe* Kuhnsche Theorie der wissenschaftlichen Entwicklung
- PL/I (Programming Language One) 216–217
- Plankalkül 149, 165
- Plutoniumbombe 87
- Plutoniumbrüter (s. *auch* SNR-300) 120
- Polyzentrische Profession als Form der Forschungsorganisation 56
- professionell integrierte Bürokratie als Form der Forschungsorganisation 57, 313
- Programmiersprachen
 - Assemblersprachen 162–165, 175, 176, 178, 180
 - frühe höhere 165
 - parallele 233
 - Proliferation 197, 231
 - Syntax und Semantik 185, 189
 - unscharfe 250

- Programmierung
 – algorithmische 231
 – als Teilgebiet der Mathematik 266
 – funktionale 231, 232
 – logische 231, 232
 – objektorientierte 231, 232
 – speicherinterne 138, 139, 151, 154, 155
 – strukturierte Programmierung 178, 188, 191
 – Vertiefung 203, 246
 – Von-Neumann-Stil 163, 183, 185
- Programmverifikation 164, 228, 230, 239
 – als ultimatives Ziel der Informatik 191
 – Komplexitätsgrenzen 229
- Quantenphysik 64, 71
- Rationalität des Forschungshandelns
 – eingeschränkte 25, 32, 48–50, 315, 323
 – epistemisch privilegierte 34
 – traditionelles Rationalmodell des Forschungshandelns 34–36, 306–307
- Reaktorlinien *siehe* Brutreaktor, Leichtwasserreaktor, Schwerwasserreaktor, Thorium-Hochtemperaturreaktor
- Reaktorphysik 30
 – als robustes Standardset von Theoremen und Methoden 66, 92, 314–316
 – Anfänge 85
 – des Dampfbrüters 118, 119
 – des Hochtemperaturreaktors 124
 – des Leichtwasserreaktors 126
 – des Schnellen Brüters 109–110, 115
- Reaktortypen
 – der ersten Generation 94
 – der zweiten Generation 94
 – Vielfalt 94
- Rechenmaschinen
 – von Aiken
 – von Babbage
 – von Stibitz
 – von Zuse
- Rechnerfamilie (s. *auch* IBM System 360) 214
- Rekursion
 – allgemeine 138–139, 145–146, 154
 – primitive 138
- relativistisches Programm der Wissenschaftssoziologie 41, 45
- Röntgen, Wilhelm Conrad 69
- Rutherford, Ernest 69–71, 74
- Samelson, Klaus 184–185
- Satisficing, als Maxime des Forschungshandelns 48–50, 311
- Schalenmodell des Atomkerns 80, 81, 89
- Schaltalgebra *siehe* Algebra
- Schließung (Closure) wissenschaftlicher Fakten und Theorien 25, 26, 44–46, 65, 89
- Schneller Brüter SNR-300 94, 109, 111
- Schulten, Rudolf 97, 120, 121–124
- Schwerwasserreaktor
 – FR-2 102, 108, 114
 – von Werner Heisenberg 88, 103
- Science and Technology Studies 24, 305
- SHARE 173, 179, 181, 205, 209
 – ALGOL-Komitee 206, 207, 210, 211
- Simon, Herbert A. 167
- Softwareengineering 231, 302, 319, 320
 – neuere Theorien 256, 257
- Softwarekrise 178, 193–195, 218, 233, 243, 254, 268

- Softwaretechnik
- als immaterielle Technik 224
 - als Kunsthandwerk 175, 196, 244
 - Anfänge der kommerziellen 172–174
 - Anfänge der militärischen 171–172
 - Eigenleben gegenüber der Informatik 225
 - Probleme der frühen 174–178
 - Wandel 224, 226–227
- Softwarezyklus 191, 227, 256, 319
- Sozialkonstruktivismus *siehe* Konstruktivismus
- Standard packages wissenschaftlicher Theorien und Methoden 44, 51, 53, 55, 58–59
- Funktion für die Forschungspolitik 50–51, 58–59
- Standardisierung (*s. auch* technische Normen)
- in der Kerntechnik 65, 125
 - in der Informationstechnik 198, 199–203, 218–219
- Stibitz, George Robert 132, 134, 147, 149–150
- Straßmann, Fritz 82, 83
- Suprenum (Numerischer Supercomputer der GMD) 290, 291
- technische Normen
- faktische/pfadabhängige 202
 - koordinative 199
 - verhandelte/vereinbarte 200
- Telephonie 142
- Thorium-Hochtemperaturreaktor THTR-300 119, 120, 123–125, 127–129
- Transfermodell
- lineares 21, 30, 31, 115, 117
 - serielles 115, 117, 261, 262, 320
- Transferprozeß
- im Projekt Schneller Brüter 114–117
 - im Projekt THTR 124
- Transurane 80, 82
- Tröpfchenmodell des Atomkerns 65, 73, 81, 85, 89
- Turing, Alan M. 143, 157, 164, 167
- Turingmaschine 133, 136, 143, 146, 149, 154, 157, 255, 312
- UNIX
- als quasi öffentliches Gut 236
 - Entstehung 282
 - Lock-in 236
- Uranbombe 87
- Uranmaschine 85
- Viper (*s. auch* Programmverifikation) 229
- Void-Koeffizient
- des Schnellbrüters 110, 118
 - des Dampfbrüters 118
- wechselseitige Anpassung von Daten und Theorien 49–50, 65, 90, 311–312
- Westinghouse 105
- Wheeler, John A. 85–87
- Whitley, Richard 18, 26, 28, 52
- Whitley-Schema (*s. auch* Organisationssoziologie) 28, 55–59, 312–313
- Wiener, Norbert 166
- Wilkes, Maurice 164
- Wirth, Niklaus 187, 213
- wissenschaftlich-technologische Lücke 193, 265
- Wissenschaftssoziologie
- Entwicklung 34–46

- Erneuerung 36
- reflexivistisches Programm 47
- traditionelle 34
- Wissensengineering (s. auch Experten-
systemtechnik) 203
- Wissensextraktion 244
 - Probleme der 244
 - als kreativer Prozeß 244
- Wissenssoziologie
 - Mannheimsche 34
 - Erneuerung 40
- X.25-Standard 281
- X.400-Standard 281
- ZMD-Gruppe (Zürich, München,
Darmstadt-Gruppe) 264, 266, 268
- Zuse, Konrad 132, 134, 139, 147–149,
165, 183