

NC-Entwicklung als gesellschaftlicher Prozeß

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e. V.
ISF München



Hartmut Hirsch-Kreinsen

NC-Entwicklung als gesellschaftlicher Prozeß

Amerikanische und deutsche
Innovationsmuster der Fertigungstechnik

Campus Verlag
Frankfurt / New York

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 333 der Universität München - "Entwicklungsperspektiven von Arbeit" - und der Arbeiten des Teilprojekts B 2 "Einflußgrößen und Entwicklungspfade posttayloristischer Rationalisierungsstrategien".

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Hirsch-Kreinsen, Hartmut:

NC-Entwicklung als gesellschaftlicher Prozess : amerikanische und deutsche Innovationsmuster der Fertigungstechnik /

Hartmut Hirsch-Kreinsen ... - Frankfurt/Main ; New York :

Campus Verlag, 1993

(Veröffentlichungen aus dem Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V., ISF München)

ISBN 3-593-34868-3

Die Veröffentlichungen werden herausgegeben vom Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V. (ISF), München.

Copyright © 1993 bei ISF, München.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ohne Zustimmung des Instituts ist unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Vertrieb: Campus Verlag, Heerstraße 149, 60488 Frankfurt.
Druck und Bindung: Druckerei Novotny, 82319 Starnberg.
Printed in Germany.

Vorwort

Die vorliegende Studie richtet sich auf die Frage nach den gesellschaftlichen Bedingungen und Voraussetzungen fertigungstechnischer Entwicklung. Dabei bezieht sich die Studie auf die neuere sozialwissenschaftliche Technikgenesediskussion, sie greift aber auch Befunde und offene Fragen aus der industriesoziologischen Forschung auf. Untersuchungsgegenstand sind der Verlauf und die Bestimmungsgründe der Entwicklung einer Basistechnik der industriellen Metallbearbeitung, nämlich NC-Steuerungen von Werkzeugmaschinen. In international vergleichender Perspektive werden die Entwicklung von NC-Steuerungen in den USA und der Bundesrepublik Deutschland sowie die sie beeinflussenden sozialen Mechanismen und gesellschaftlichen Bedingungen im Zeitraum zwischen dem Beginn der 50er Jahre und dem Ende der 80er Jahre analysiert.

Während die NC-Technik Anfang der 50er Jahre auf der Basis der damals verfügbaren Computer- und Steuerungstechnologien in den USA erfunden wurde und über lange Zeit einem relativ spezialisierten, auf hohe Automatisierung gerichteten Entwicklungspfad folgte, nahm ihre Ende der 50er Jahre in der Bundesrepublik beginnende Entwicklung einen deutlich breiteren und marktorientierteren Entwicklungsverlauf. Zurückgeführt werden diese Divergenzen auf einen in beiden Ländern sehr verschieden verlaufenden Prozeß der Verwissenschaftlichung fertigungstechnischer Entwicklung und seiner Abstimmung mit den Anforderungen der Praxis industrieller Produktionsprozesse. Sie erklären sich durch die jeweils verschiedenen institutionellen, industrie- und gesellschaftsstrukturellen Entwicklungs- und Anwendungsbedingungen der NC-Technik, deren Zusammenhänge als nationalspezifische Innovationsmuster fertigungstechnischer Entwicklung verstanden werden können.

Die Untersuchung entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 333 der Ludwig-Maximilians-Universität München - "Entwicklungsperspektiven von Arbeit" - und der Arbeiten des Teilprojekts B 2 - "Einflußgrößen und Entwicklungspfade posttayloristischer Rationalisierungsstrategien" -, dessen Perspektive sich auf die Analyse der Mechanismen, Zwänge, Impulse und Prozesse richtet, die die gegenwärtige Umbruchsituation von In-

dustriearbeit konstituieren. Neben anderen Faktoren wird dabei den Verkaufsformen und Bedingungen der Entwicklung fertigungstechnischer Systeme und Anlagen ein nicht unwesentlicher Einfluß auf betriebliche Rationalisierungsstrategien und damit den Entwicklungsperspektiven von Industriearbeit zugemessen.

Die Untersuchungsarbeiten begannen Ende 1987 und mußten aufgrund der Anforderungen parallel zu bearbeitender Projekte mehrmals über längere Phasen unterbrochen werden. Erste Teilergebnisse wurden in mehreren sowohl sozialwissenschaftlich als auch ingenieurwissenschaftlich orientierten Aufsätzen publiziert (z.B. Hirsch-Kreinsen 1988; 1989; 1992) und in Vorträgen einer interessierten Fachöffentlichkeit zur Diskussion gestellt. Ende 1992 wurde die Arbeit in ihren Grundzügen abgeschlossen. Die Studie wurde im Herbst 1993 unter dem Titel "Innovationsmuster der NC-Technik in den USA und der Bundesrepublik Deutschland" als Habilitationsschrift am Fachbereich Gesellschafts- und Geschichtswissenschaften (FB 2) der Technischen Hochschule Darmstadt eingereicht.

Für die überaus intensive und kritische Begleitung der Arbeit bin ich vor allem Prof. Dr. Joachim Bergmann zu Dank verpflichtet. Anregungen und Kommentare verdanke ich weiterhin Prof. Dr. Rudi Schmiede und Prof. Dr.-Ing. Herbert Schulz sowie Dr. Christoph Heine. Für die Diskussion meiner Thesen gilt mein besonderer Dank den ISF-Kollegen Dr. Marhild von Behr, Dr. Rainer Schultz-Wild, Dr. Daniel Bieber und Prof. Dr. Burkart Lutz, der nachdrücklich zu der Arbeit ermutigte. Schließlich möchte ich Ulrich Ramge für die Assistenz vor allem während der Schlußphase der Arbeiten danken.

Zu Dank verpflichtet bin ich darüber hinaus den zahlreichen amerikanischen und deutschen Gesprächspartnern aus Werkzeugmaschinenbetrieben, von Steuerungsherstellern, Verbänden und ingenieurwissenschaftlichen Instituten für die vielfältigen Informationen, die sie mir bei meinen Recherchen über die NC-Entwicklung zur Verfügung stellten und vor allem auch für die Zeit, die sie für die Gespräche aufbrachten.

Für die Endkorrektur und die buchtechnische Fertigstellung des Manuskripts danke ich Christa Hahlweg.

München/Darmstadt, im Oktober 1993

Hartmut Hirsch-Kreinsen

Inhalt

Vorwort	1
Verzeichnis der Tabellen	6
Verzeichnis der Bilder	8
I. Die Frage nach den sozialen Bedingungen der Entwicklung von Fertigungstechnik	11
1. Zur industriesoziologischen Technikdiskussion	11
2. Die neuere Technikgenese-Diskussion	15
3. Zu Nobles "Forces of Production"	17
4. Fragestellung und Methode der Untersuchung	20
II. Bedingungen und Verlaufsformen fertigungs-technischer Entwicklung	23
1. Strukturmerkmale technischer Entwicklung	23
2. Die Verwissenschaftlichung von Technik-entwicklung	26
3. Probleme der Verwissenschaftlichung	33
4. Die Besonderheiten von Fertigungstechnik	39
5. Fertigungstechnische Entwicklungspfade und Innovationsmuster	48
III. Entwicklungspfade der NC-Technik	53
1. Technische Merkmale	53
2. Genereller Verlauf der Entwicklung	57
3. Verschiedene Entwicklungspfade	62

IV.	NC-Entwicklung in den USA	71
1.	Konzentrierung auf weitreichende Automatisierung	71
2.	Alternativen bleiben erfolglos	96
V.	NC-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland	105
1.	Hauptpfad der Entwicklung: Begrenzte Automatisierung	105
2.	Werkstattorientierte Steuerungen als mögliche Alternative	118
3.	Innovationssprung und zunehmende Bedeutung werkstattorientierter Steuerungen	127
VI.	Amerikanische Innovationsmuster	139
1.	Ziviles Innovationsmuster	140
1.1	Das amerikanische Modell der Massenproduktion	140
1.2	Konservative Entwickler-Anwender-Beziehungen	148
2.	Wissenschaftlich-militärisches Innovationsmuster	154
2.1	Rüstungsorientierter Staatsinterventionismus	155
2.2	Spezialisierte Entwickler-Anwender-Beziehungen	162
2.3	Wissenschaftliche Strukturierung des technischen Personals	172
VII.	Deutsches Innovationsmuster	183
1.	Investitionsgüter- und exportbestimmtes Produktionsmodell	184
2.	Flexible Entwickler-Anwender-Beziehungen	188
3.	Theoretische und praktische Strukturierung des technischen Personals	197
4.	Industrielle Ausrichtung des FuE-Systems	204

VIII.	Sozioökonomischer Umbruch und neue Anforderungen an die Fertigungstechnik	211
1.	Zur Elastizität von Innovationsmustern	211
2.	Wandel der industriellen Anwendungsbedingungen	213
3.	Angepaßte Weiterentwicklung von Fertigungstechnik in der Bundesrepublik	215
4.	Innovationsschwäche in den USA	221
5.	Zukünftige Probleme	232
IX.	Technischer Wandel und sozioökonomische Dynamik	243
1.	Zur ökonomischen Dynamik der Nachkriegszeit	246
2.	Der Einfluß des fertigungstechnischen Wandels auf die ökonomische Dynamik	256
	Literatur	269
	Das Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V. München	289

Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Produktion von NC-Maschinen in den USA und in der Bundesrepublik in Stück und Anteil an der gesamten Werkzeugmaschinenproduktion in % des Gesamtwerts	60
Tab. 2:	Verbreitung von NC-Maschinen in den USA und in der BRD; ungefährender Anteil am Gesamtbestand von Werkzeugmaschinen in %	61
Tab. 3:	Anteil verschiedener Steuerungsarten an der Jahresproduktion von NC-Maschinen in den USA und in der BRD in den 50er und 60er Jahren	88
Tab. 4:	Wichtige Absatzbranchen für NC-Maschinen in den 50er und 60er Jahren; Anteil an der Gesamtzahl produzierter und im Inland abgesetzter NC-Maschinen in %	90
Tab. 5:	Import von Werkzeugmaschinen aus den USA und Japan in die BRD; Anteil am Gesamtimport von Werkzeugmaschinen in %	114
Tab. 6:	Entwicklung der Industriestruktur der USA nach Beschäftigten (in Tausend und % der gesamten Industrie)	141
Tab. 7:	Entwicklung der Industriestruktur der BRD nach Beschäftigten (in Tausend und % des Verarbeitenden Gewerbes)	142
Tab. 8:	Betriebe und Beschäftigte in der gesamten Industrie der USA und der Bundesrepublik nach Größenklassen 1972 (in %)	143
Tab. 9:	Güter- und Dienstleistungsexporte und -importe in % des Bruttosozialprodukts	145
Tab. 10:	Staatsanteil an FuE insgesamt (in %)	160

Tab. 11:	Militäranteil an staatlichen FuE-Ausgaben 1963 bis 1981 (in %)	161
Tab. 12:	Anteile von Wirtschaftszweigen in der Bundesre- publik an den Ausgaben des Bundes für Wissen- schaft, Forschung und Entwicklung (in %)	206
Tab. 13:	Beschäftigung im Werkzeugmaschinenbau in den USA und in der BRD (in Tausend)	217
Tab. 14:	Entwicklung des Werkzeugmaschinenbaus in den USA, der BRD und Japan	219
Tab. 15:	Import von Werkzeugmaschinen aus der BRD und Japan in die USA; Anteil am Gesamtimport von Werkzeugmaschinen in %	223

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Prinzip einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine	55
Bild 2:	Abfolge der Steuerungsgenerationen	59
Bild 3:	Generelle Entwicklung von Handeingabesteuerungen seit 1970	65
Bild 4:	Steuerungsarten	67
Bild 5:	Vertikalfräsmaschine Cincinnati Hydrotel mit MIT NC-Steuerung 1952	72
Bild 6:	Schablonen zur Herstellung von Rotorblättern	74
Bild 7:	Von der Air Force beschaffte Kearney and Trecker Profilfräsmaschine mit Bendix Steuerung für die Northrop Flugzeugwerke; zweite Hälfte der 50 Jahre	79
Bild 8:	NC-Steuerung Mark Century 550 von General Electric 1974	94
Bild 9:	Doppelbildschirmsteuerung "Ultimax" von Hurco 1988	102
Bild 10:	Lehr- und Versuchsanlage für numerische Steuerungen an der Technischen Hochschule Darmstadt 1958	107
Bild 11:	Bedienungstafel einer NC-Steuerung für Lochstreifenbetrieb 1962	111
Bild 12:	Zwei- bis Vier-Achsen-Streckensteuerung für die Fräsbearbeitung von Masing (später Bosch), die zwischen 1964 und 1970 verkauft wurde	112
Bild 13:	Numerisch gesteuerte Revolverdrehmaschine mit drei Achsen	121

Bild 14:	Ausschließlich für Handeingabe ausgelegte Hardware-NC-Steuerung, erstmals 1971 vorgestellt	126
Bild 15:	NEF-Handeingabesteuerung 1975/76	130
Bild 16:	Universalfräsmaschine mit Handeingabesteuerung; erste Hälfte der 80er Jahre	132

I. Die Frage nach den sozialen Bedingungen der Entwicklung von Fertigungstechnik

1. Zur industriesoziologischen Technikdiskussion

Fertigungstechnische Entwicklung ist Teil des "technischen Wandels", der als gesellschaftlich endogener Prozeß zu begreifen ist. Obgleich diese Sichtweise in der sozialwissenschaftlichen Diskussion spätestens seit den 70er Jahren unumstritten ist, stand diese These über viele Jahre hinweg am Rande des Forschungsinteresses. Insbesondere in der Industriesoziologie war eine Auffassung vorherrschend, derzufolge letztlich ökonomische Interessen die Richtung der technischen Entwicklung vorgeben, wobei bestimmte funktionale Notwendigkeiten sowie technologische und naturwissenschaftliche Sachgesetzmäßigkeiten als Randbedingungen figurierten. Da damit Ziel und Korridor der technischen Entwicklung als vorgezeichnet angesehen wurden, war die Frage nach Alternativen der technischen Entwicklung und ihren Bedingungen und Bestimmungsfaktoren irrelevant.

Das primäre Forschungsinteresse der Industriesoziologie richtete sich auf die Frage nach den gesellschaftlichen Voraussetzungen des Einsatzes und der Nutzung neuer Fertigungstechniken und den damit verbundenen Konsequenzen für die Tätigkeiten und Qualifikationen der Arbeitskräfte, den sogenannten "Arbeitsfolgen". Dabei lassen sich zwei verschiedene, teilweise überlappende Forschungsphasen und Interpretationen unterscheiden. Mit der älteren, bis weit in die 70er Jahre hinein einflußreichen Phase verband sich eine Auffassung, wonach Fertigungstechnik im Kontext genereller Strategien der Kapitalverwertung nicht nur als gegeben angesehen werden müsse, sondern daß Fertigungstechnik zwangsläufig eine bestimmte Form der Arbeitsorganisation, der Arbeitsplätze und Tätigkeiten nach sich ziehe. Diese, bekanntermaßen mit dem Etikett "Technikdeterminismus" versehene Auffassung hatte arbeitspolitisch den Vorteil, bei Entscheidungen über die Arbeitsgestaltungen im Personaleinsatz die Komplexität des Entscheidungskalküls und der dabei zu berücksichtigenden Faktoren zu reduzieren. Er hatte forschungsstrategisch den Vorteil, daß man nur bestimmte, fortgeschrittene Stadien und Typen des Technik-

einsatzes zu untersuchen brauchte, um begründete Prognosen über die zukünftige Entwicklung von Arbeitsorganisation, Tätigkeiten und Qualifikationen im industriellen Produktionsprozeß treffen zu können.¹

Wie vielfach diskutiert und an dieser Stelle als bekannt vorauszusetzen, speiste sich die Kritik an dieser Auffassung sowohl aus empirischen Befunden als auch theoretischen Überlegungen und lief darauf hinaus, die Beziehung zwischen Technik und Arbeit als weit weniger eindeutig durch technische Anforderungen determiniert anzusehen. Schon ab den frühen 70er Jahren begann daher die industriesoziologische Analyse des Einsatzes von Fertigungstechniken in eine zweite Phase einzutreten, die den Fokus auf nichttechnische Bedingungen der Arbeitsgestaltung und die Konsequenzen für Arbeitsplätze, Tätigkeiten und Qualifikationen richtete. Als Determinante der "Arbeitsfolgen" wurden, und werden im Grunde genommen bis heute, die Gestaltung der Arbeitsorganisation und die darin angelegten Strukturen von Arbeitsteilung und Hierarchie angesehen, die ihrerseits von einer ganzen Reihe sehr verschiedener politischer, sozialer und ökonomischer Bedingungen und Strukturen beeinflusst werden. Vorherrschend wurde eine Interpretation des Technikeinsatzes, derzufolge der Betrieb als die zentrale Instanz und die betriebliche Rationalisierung als wichtigste Form betrieblichen Handelns entscheidend für die Gestaltung und Entwicklung von Technik und Arbeit angesehen werden müssen. Die Erklärung der empirisch beobachtbaren Veränderungen und Varianten von Industriearbeit ist demzufolge vor allem in den betrieblichen Maßnahmen und Politiken der Rationalisierung von Produktions- und Arbeitsprozeß, in den dahinterliegenden Strategien bzw. Produktionskonzepten und in dem für sie jeweils maßgeblichen externen oder internen Bedingungen zu suchen (Lutz 1990, S. 617).

Diesen grob unterscheidbaren Phasen industriesoziologischer Forschung lassen sich recht gut auch jene Studien zuordnen, die sich mit dem Einsatz und den Folgen NC-gesteuerter Werkzeugmaschinen befaßten. Offenbar waren von Beginn ihres Einsatzes an nicht nur Ingenieure und Techniker, sondern auch Sozialwissenschaftler von dieser Technik fasziniert. So liegt schon aus der zweiten Hälfte der 60er Jahre eine erste größere sozialwis-

1 Zur Bedeutung des "Technikdeterminismus" in der sozialwissenschaftlichen Diskussion und seiner späteren Überwindung vgl. vor allem die bekannten Thesen von Lutz (z.B. 1987; 1990).

senschaftliche Untersuchung über die Bedingungen und Folgen des Einsatzes von NC-Maschinen vor.² Die Gründe für das Interesse an dieser Technik lagen vor allem darin, daß diese Technik die hohen Rationalisierungsbarrieren in der komplexen Produktion der metallverarbeitenden Einzel- bis Mittelserienfertigung zu überwinden versprach und qualifikationsintensive Arbeitsprozesse betroffen waren, so daß sich mit dem fortschreitenden NC-Einsatz die Frage nach der Zukunft qualifizierter Maschinenfacharbeit unmittelbar aufdrängte. Zudem wurde diese Technik als eines der wichtigsten technischen Mittel moderner Rationalisierungsstrategien angesehen.³ Den Hypothesen und Befunden von Untersuchungen über den NC-Einsatz kam daher in der industriesoziologischen Debatte um die Entwicklung von Technik und Arbeit häufig ein sehr hoher Stellenwert zu.

In den 70er Jahren wurde in mehreren Studien⁴ der fortschreitende NC-Einsatz als Durchsetzung des in den Industrien der Massenfertigung bewährten tayloristischen Rationalisierungsmusters auch in der komplexen und qualifikationsintensiven Metallverarbeitung begriffen. Über die NC-Technik führten - so die übereinstimmende Auffassung - durch Managementhandeln vermittelte Interessen der Kapitalverwertung zwangsläufig zu einer Auflösung der zuvor qualifizierten und ganzheitlichen Tätigkeiten von Facharbeitern an konventionellen Werkzeugmaschinen, zu einer sich vertiefenden Teilung von dispositiven und ausführenden Arbeitsaufgaben und damit zu einer verbesserten Beherrschung der Arbeitsprozesse durch die Planungsinstanzen. Mit dieser Interpretation des NC-Ansatzes reproduzierten nicht wenige dieser industriesoziologischen Studien die Absichten und Ziele vieler an der Entwicklung und frühen Verbreitung der NC-Technik beteiligten Techniker, Ingenieure und Manager, die hofften, daß durch die neue Technik der Einsatz qualifizierter Facharbeiter unnötig

-
- 2 Die Ergebnisse dieser im Auftrag des RKW von einer Arbeitsgruppe im Umfeld des ISF München durchgeführten Studie liegen in einem umfangreichen, nicht publizierten Forschungsbericht vor (Pirker u.a. 1970) sowie in einer zusammenfassenden Buchpublikation (Schultz-Wild, Weltz 1973).
 - 3 Ähnliches galt für die vergleichbare Debatte in den USA, in der seit den 60er Jahren der NC-Technik die Rolle eines "key witness" der generellen Entwicklung von Technik und Arbeit zugeschrieben wurde (Adler, Borys 1989).
 - 4 Zu nennen sind vor allem die Untersuchungen des SOFI von Mickler u.a. (1977) und Mickler (1981) sowie die Computerstudie des Frankfurter Instituts für Sozialforschung von Benz-Overhage u.a. (1982).

wurde und auch in der komplexen Einzel- und Kleinserienfertigung leichter rekrutierbare und billigere angelernte Arbeitskräfte nur noch zur bloßen Überwachung und Beschickung der automatisierten Werkzeugmaschinen eingesetzt werden könnten.

Spätere Studien mit umfangreicheren Betriebsvergleichen und international vergleichenden Analysen betonten hingegen Varianzen der Arbeitsorganisation, Tätigkeiten und Qualifikationen beim Einsatz von NC-Maschinen.⁵ Danach ist in der Bundesrepublik schon nahezu von Anbeginn des NC-Einsatzes an, von einem relativ breiten Spektrum betriebs- und arbeitsorganisatorischer Nutzungsformen dieser Maschinen auszugehen, die sich auf "strategische Grundentscheidungen" (Schultz-Wild, Weltz 1973, S. 94) und darin eingebettete Macht- und Interessenkonstellationen der Betriebe zurückführen lassen (Bergmann u.a. 1986, S. 48 ff.).⁶

Fraglos hängen diese divergierenden Befunde und Interpretationen mit verschiedenen theoretischen Konzepten, daraus sich ergebenden Untersuchungsfragen und einem je spezifischen methodischen Zugang zum Untersuchungsfeld zusammen. Es ist aber darüber hinaus zu fragen, ob die Divergenzen nicht auch auf die Vernachlässigung einer wichtigen Randbedingung der verschiedenen Typen arbeitsorganisatorischer NC-Nutzung verweisen, nämlich den Einsatz technisch verschieden ausgelegter und mit unterschiedlichen Gestaltungsspielräumen für die Arbeitsorganisation versehener NC-Maschinen. Erste Hinweise auf die Relevanz dieses Aspekts finden sich schon in der frühen Studie von Pirker u.a. (1970), wo die Existenz verschiedener Steuerungsarten belegt wird, ohne freilich ihre Konsequenzen für Arbeitsorganisation, Tätigkeiten und Qualifikationen zu berücksichtigen.

5 Neben der frühen Studie von Pirker u.a. (1970) vgl. hierzu die Studien von Remp u.a. 1981; Sorge u.a. 1982 sowie zuletzt Bergmann u.a. 1986.

6 Auch in den USA lassen sich, freilich nicht ganz vergleichbare, Phasen sozialwissenschaftlicher NC-Forschung unterscheiden. Besonders wichtig sind hier einerseits die bekannten, im Kontext der Labor Process Debate entstandenen Studien vor allem von Braverman und Shaiken, denen zufolge eine Degradierung von Werkstattarbeit bei NC-Einsatz auf ökonomische, insbesondere jedoch Herrschaftsinteressen des Managements zurückführbar sei. Andererseits finden sich neuerdings Untersuchungen - als "Social Construction School" bezeichnet -, die sehr verschiedene Nutzungsformen der NC-Technik betonen und als Gründe hierfür ein ganzes Bündel sehr verschiedener sozialer und politischer Bedingungen anführen (vgl. hierzu zusammenfassend Adler, Borys 1989).

Diese Befunde verweisen auf ein Problem nicht nur in den genannten NC-Untersuchungen, sondern generell in der industriesoziologischen Diskussion: Die offensichtliche Existenz technischer Alternativen und ihre Relevanz für die "Arbeitsfolgen" werden nicht eigentlich thematisiert, und es wird schon gar nicht die damit zusammenhängende Frage nach ihren Entstehungsbedingungen aufgegriffen. Obgleich spätestens mit dem "Münchener Betriebsansatz", in dem Arbeit wie auch Technik als "elastische Potenzen" in Produktionsprozessen gelten, Technik als im betrieblichen Interesse gestaltbar begriffen werden kann und damit die Forschungsperspektive für die Frage nach Bedingungen und Verläufen fertigungstechnischer Entwicklung geöffnet war, wurde diese Frage bis weit in die 80er Jahre hinein in der Industriesoziologie weder gestellt noch bearbeitet.

2. Die neuere Technikgenese-Diskussion

Erst die gesellschaftspolitische Thematisierung des "technischen Fortschritts", die sich vor allem an den Risiken der zivilen Nutzung der Kernenergie entzündete, induzierte gegen Ende der 70er Jahre ein wachsendes sozialwissenschaftliches Interesse an Prozessen der Technikentwicklung. Dabei konnte allerdings schon auf die Ergebnisse einiger wissenschafts- und technikkritischer Studien zurückgegriffen werden.⁷ Die auf diesem Wege sich in den 80er Jahren allmählich etablierende sozialwissenschaftliche "Technikgeneseforschung" verfolgt bis heute eine ganze Reihe, teilweise recht disparater Ansätze und Konzepte, mit denen der Frage nach den Bedingungen und Mechanismen des "Social Shaping of Technology"⁸ nachgegangen werden soll.

Die theoretischen Konzepte und Untersuchungsansätze umfassen mit unterschiedlicher Gewichtung ein weites Feld von Entwicklungsbedingungen, das von sozioökonomischen Strukturbedingungen über institutionelle und politische Einflüsse bis hin zu mikrostrukturellen und kulturellen Momenten, wie Orientierungskomplexen, Diskursarenen und Leitbildern

7 Ein erster Überblick der damaligen Diskussion findet sich in dem von Jokisch herausgegebenen Sammelband "Techniksoziologie" (1982).

8 So der Titel eines grundlegenden Aufsatzes über soziale Bedingungen von Technikentwicklung von MacKenzie und Wajcman (1985).

kollektiver und individueller Akteure, reicht. Die Untersuchungsfragen der hier zu verortenden Studien rücken teilweise generelle Aspekte wissenschaftlicher und technologischer Entwicklung ins Zentrum des Interesses, teilweise geht es um die Innovation und Diffusion großtechnischer Systeme (Mayntz, Hughes 1988), wie z.B. die Entwicklung kerntechnischer Anlagen oder die Erfindung und Verbreitung neuer Kommunikationstechniken; zunehmend werden darüber hinaus Alltagstechniken Gegenstand solcher Untersuchungen.⁹

Die fertigungstechnische Entwicklung wurde bislang jedoch selten untersucht. Im Unterschied etwa zur Entwicklung großtechnischer Systeme ist sie ein typisches Beispiel für einen evolutionären Prozeß von Technikentwicklung, bei dem, wie noch auszuführen ist (Kap. II), in der Regel neue wissenschaftlich-technologische Erkenntnisse und sich ändernde Entwicklungsziele mit vorhandenen und seit langem ausgereiften Systemen und Komponenten abgestimmt und auf deren Basis realisiert werden. Entwicklungssprünge sind eher die Ausnahme denn die Regel.

Die Gründe für dieses bislang begrenzte Interesse sozialwissenschaftlicher Technikforschung an der fertigungstechnischen Entwicklung liegt wohl nicht zuletzt in der Schwierigkeit, den Entwicklungsprozeß dieser Technik sinnvoll eingrenzen zu können, vermutlich aber auch in dem wenig sensationellen Charakter von Fertigungstechnik. Auch boten die industriesoziologischen Analysen und Befunde über viele Jahre hinweg keinen Anstoß, systematisch nach der Genese und auch den Alternativen fertigungstechnischer Systeme zu fragen. Man interessierte sich für die "Arbeitsfolgen" bestehender Maschinen und Anlagen und sah daher für eine Erweiterung der Fragestellung keinen Anlaß. Erst im Zuge der Diskussion über die sozioökonomischen Krisen- und Umbruchtendenzen der industriell-kapitalistischen Länder seit Mitte der 70er Jahre, in deren Zentrum ein vermuteter Wandel der industriellen Arbeit steht, erhielten die Fragen nach den Bedingungen und Mechanismen der fertigungstechnischen Entwicklung erhöhte Relevanz. Es wurden insbesondere in letzter Zeit einige sozialwissenschaftliche Studien dazu vorgelegt.¹⁰ Die Frage nach den

9 Dazu zusammenfassend Rammert 1991 und die dort angegebene Literatur.

10 Zu nennen sind hier insbesondere Arbeiten aus dem ISF München (z.B. Döhl 1989; Deiß u.a. 1990), die Bielefelder Arbeiten von Asdonk u.a. (1991) und ein Sammelband von Bergstermann und Manz (1992).

Verlaufsformen und sozialen Bedingungen fertigungstechnischer Entwicklung gewinnt für die sozialwissenschaftliche Diskussion um den gesellschaftlichen Wandel an Bedeutung, da die ökonomische Krise von einem breiten mikroelektronischen Technisierungsschub begleitet ist und Fertigungstechnik ein wichtiger Bestimmungsfaktor für zukünftige betriebliche Rationalisierungsstrategien ist. Denn Fertigungstechnik kann durch ihre je spezifische Auslegung Rationalisierungsstrategien und die damit verbundenen zukünftigen Formen von Tätigkeiten, Qualifikationen und Personaleinsatz in verschiedene Richtungen drängen.

3. Zu Nobles "Forces of Production"

Eine der wenigen frühen und international bekannt gewordenen Studien, die sich mit der Genese von Fertigungstechnik befaßt, ist die umfangreiche Untersuchung des amerikanischen Technikhistorikers David F. Noble über die Entwicklung NC-gesteuerter Werkzeugmaschinen in den USA.¹¹ Das besondere Verdienst dieser Studie liegt darin, zu zeigen, daß erstens bei fertigungstechnischer Entwicklung Alternativen existieren und daß zweitens die Prozesse der Auswahl zwischen den Alternativen sozial und politisch bestimmt sind. Noble spricht von "social choices" bei der Technikentwicklung. Insbesondere betont er den Einfluß von Herrschaftsinteressen und technokratischen Orientierungen der an der NC-Entwicklung beteiligten Wissenschaftler und Ingenieure vor dem Hintergrund massiver arbeitspolitischer Konflikte in den USA der 40er und 50er Jahre, in denen die ersten maßgeblichen Entwicklungsschritte mit der neuen Technik eingeleitet wurden. Technologische wie aber auch ökonomische Kriterien spielten bei der Entwicklung dieser Technik, Noble zufolge, eine nur sehr nachgeordnete Rolle. Wie noch genauer zu zeigen ist, entschieden diese spezifischen Entwicklungsbedingungen über die Wahl jener Alternative der NC-Technik, die eine vertiefte Trennung von Planung und Ausführung im Produktionsprozeß, eine Dequalifizierung zuvor qualifizierter

11 Vor allem sein umfangreiches Buch "Forces of Production" (1984) sowie seinen früheren Aufsatz "Social Choice in Machine Design: The Case of Automatically Controlled Machine Tools" (1979a). In deutscher Übersetzung liegen zwei Aufsätze vor: "Maschinen gegen Menschen" (1979); "Die Entwicklung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen" (1986).

Maschinenarbeit und damit eine Steigerung der Kontrollierbarkeit des Arbeitsprozesses durch das Management ermöglichte.

Freilich bedarf Nobles Interpretation der NC-Entwicklung der kritischen Ergänzung. Seine Sicht der Entwicklung dieser Technik bezieht sich in erster Linie auf die amerikanische Entwicklung, was bei der Rezeption seines Buches in der Bundesrepublik häufig übersehen wurde, und er steht im Kontext der Kontrolldebatte der anglo-amerikanischen Industriesoziologie. Dabei nahm er mit seinen Thesen über den besonderen Einfluß von Kontrollinteressen auf die Technikentwicklung maßgeblichen Einfluß auf die Diskussion der vor allem von Braverman (1977) vorgetragenen Thesen über eine fortschreitende Fungibilisierung von Arbeitskraft im industriellen Produktionsprozeß.

Hierzu ist anzumerken, daß er die Bedeutung von Herrschafts- und Kontrollinteressen des Managements und von Ingenieuren und Wissenschaftlern für die Entwicklung der NC-Technik überbetont: Er achtet in seiner Interpretation Interessendivergenzen zwischen den an der Technikentwicklung beteiligten Ingenieurgruppen, insbesondere die Ziele und Interessen von Betriebspraktikern einerseits und von theoretisch orientierten Ingenieuren und Wissenschaftlern andererseits, als zu gering und vernachlässigt ihre zentrale Bedeutung für den Entwicklungsverlauf. Zwar geht er ausführlich auf die Konflikte zwischen der Gruppe um den Betriebspraktiker John T. Parsons, der als "Erfinder" der NC-Technik angesehen wird, und den die Entwicklung letztlich bestimmenden Wissenschaftlern aus dem MIT ein (Noble 1984, S. 96 ff.), doch bleibt die Hauptlinie seiner Interpretation an den grundlegenden Interessenunterschieden zwischen Management und Maschinenarbeitern fixiert (z.B. S. 265 ff.). Demgegenüber wird bei der folgenden Analyse der NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik in dem Spannungsverhältnis zwischen der fortschreitenden Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung einerseits und den praktischen Anforderungen industrieller Technikanwendung andererseits ein wichtiger Bestimmungsfaktor für den Verlauf fertigungstechnischer Entwicklung gesehen.

Dabei verlieren in international vergleichender Perspektive die von Noble akzentuierten Momente von Herrschaft und Kontrolle im Arbeitsprozeß einen Gutteil ihrer Erklärungskraft. So ist mit seiner Interpretation die im Hinblick auf die Zentralisierung der Programmierung anders verlaufende

NC-Entwicklung in Westdeutschland trotz gleichfalls virulenter technokratischer Orientierungen und Kontrollinteressen von Technikern und Ingenieuren (Bergmann u.a. 1986) nur schwer plausibel zu machen. Denn unübersehbar ist, daß die NC-Entwicklung vor allem in der Bundesrepublik sich seit längerem eher an der Verfügbarkeit und dem hier verbreiteten Einsatz qualifizierter Facharbeiter und den besonderen Praxisanforderungen mittlerer und kleinerer Betriebe orientiert; darauf verweisen die Ergebnisse der industriesoziologischen Studien und ebenso Beiträge aus dem weiten Feld der ingenieurwissenschaftlichen Literatur (z.B. Simon 1971, S. 452 ff.; Weck 1982, S. 147 ff.; Blum 1987; Weber 1988), schließlich aber auch einige beiläufige Bemerkungen von Noble selbst (1984, S. 222).

Selbst unter der Voraussetzung, daß das Moment der Herrschaft und Kontrolle in den industriellen Beziehungen der USA eine weit größere Bedeutung hat als in Deutschland, vernachlässigt Noble mit seiner Interpretation, daß die Zentralisierung der Programmierung bei der amerikanischen NC-Technik, wie umgekehrt dezentralisierte Formen der Programmierung, wie Werkstattprogrammierung in der Bundesrepublik, auf den jeweiligen sozial und ökonomisch bestimmten Kontext der NC-Entwicklung zurückzuführen sind. Zwar schließt Noble den Einfluß gesellschaftlicher Strukturbedingungen nicht aus, doch werden sie in seiner stark handlungsorientierten Interpretation als gegeben und selbstverständlich vorausgesetzt und nicht weiter problematisiert.¹² Daher kann die der amerikanischen NC-Entwicklung immanente Tendenz einer Zunahme von Kontrolle des Arbeitsprozesses als nicht intendiertes, aber aus einer Gesamtlage der Entwicklung resultierendes Moment begriffen werden; und fraglos gab es eine starke Affinität zwischen dieser Entwicklungstendenz und den vorherrschenden Orientierungen und Interessen von Technikern, Ingenieuren und Informatikern. Noble jedoch setzt die vorherrschenden Kontrollinteressen dieser Akteure vorschnell mit generellen, aus dem Zusammenspiel verschiedenster sozialer Bedingungen naturwüchsig resultierenden Zielen der Technikentwicklung gleich.

12 Vor der Gefahr, daß die jeweils eigenen gesellschaftlichen Bedingungen als selbstverständlich vorausgesetzt werden, ist wohl kaum ein Sozialwissenschaftler gefeit. Wie leicht ironisch Pam Meil (1992) aus amerikanischer Sicht zeigt, gilt dies in besonderer Weise auch für die westdeutsche Industriesoziologie.

4. Fragestellung und Methode der Untersuchung

An diesen offenen Fragen setzt die vorliegende Studie an. Sie thematisiert die gesellschaftsstrukturellen Voraussetzungen fertigungstechnischer Entwicklung. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, daß die fertigungstechnische Entwicklung in enger Wechselwirkung mit den sozioökonomischen Strukturbedingungen und Problemlagen industrieller Produktion und Arbeit steht. Da ein Gutteil relevanter sozial- und industriestruktueller Bedingungen nationalspezifischen Charakter trägt, muß weiterhin angenommen werden, daß im internationalen Vergleich unterscheidbare Entwicklungspfade von Fertigungstechnik aufzufinden sind.

Gegenstand der Untersuchung sind die Entwicklung von NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen und ihre gesellschaftlichen Bestimmungsgründe. Aufgrund ihrer funktionalen und kapazitiven Bedeutung, vor allem in Prozessen der Metallverarbeitung, und ihrer inzwischen hohen Verbreitung können NC-Maschinen als industrielle Basistechnik angesehen werden. Dabei ist diese Technik als typisches Beispiel für eine verwissenschaftlichte Technik anzusehen, da sie auf den Erkenntnissen der Informatik und Computertechnologie basiert, wobei bei ihrer Entwicklung und Weiterentwicklung freilich ein ständiger Abstimmungsprozeß mit den kontingenten Erfordernissen des industriellen Produktionsprozesses notwendig ist.¹³

Daher lag es methodisch nahe, die Untersuchung als internationalen Vergleich zu konzipieren. Sowohl aufgrund einer relativ günstigen Materiallage, insbesondere der umfangreichen Daten und Belege in Nobles Untersuchung, als auch des Tatbestands, daß die NC-Technik ihren Ursprung in den USA hatte und später in der Bundesrepublik aufgegriffen wurde, konzentriert sich der Vergleich auf die Technikentwicklung in den USA und der Bundesrepublik Deutschland. Bis auf wenige Anmerkungen wird dagegen die insbesondere in den letzten zehn bis 15 Jahren auf den internationalen Technikmärkten zunehmend wichtiger werdende japanische NC-Technik ausgeklammert. Diese fraglos problematische Beschränkung der Untersuchung hat zum einen arbeitsökonomische, zum anderen aber durchaus auch sachliche Gründe, da in ihren frühen Phasen bis zu den 70er Jahren die NC-Technik hauptsächlich von den USA und im weiteren

13 Zur Definition dieser Begriffe vgl. das folgende Kapitel II.

Verlauf auch von der Bundesrepublik geprägt wurde, während die japanische Entwicklung erst später einsetzte und auf den amerikanischen und deutschen Erfahrungen aufbaute.

Die empirische Basis der vorliegenden Untersuchung umfaßt zum einen das Material, das von Noble über die NC-Entwicklung ausgebreitet wird und das gleichsam als Folie für die eigenen Erhebungen und Interpretation der Befunde genutzt wurde. Zum zweiten basiert die Untersuchung auf der Nutzung und Reinterpretation von empirischen Materialien aus thematisch verwandten industriesoziologischen Untersuchungen des ISF München, an denen der Autor beteiligt war und ist. Zum dritten umfaßt die Materialbasis die einschlägige technische und ingenieurwissenschaftliche Literatur; neben einer Vielzahl von deutsch- und englischsprachigen Monografien und Lehrbüchern handelte es sich dabei um technische Zeitschriften, wie beispielsweise "Werkstatt und Betrieb" oder "VDI-Z" aus der Bundesrepublik und vor allem "American Machinist" aus den USA sowie eine Vielzahl von Dokumenten und Unterlagen deutscher und amerikanischer NC-Hersteller. Zum vierten wurde in der Bundesrepublik und in den USA eine größere Zahl von Expertengesprächen mit technischen Experten aus Werkzeugmaschinenbetrieben, von NC-Herstellern, Verbänden und ingenieurwissenschaftlichen Instituten und ebenso mit Sozialwissenschaftlern durchgeführt, die als Experten der NC-Technik angesehen werden.

Insgesamt fanden 31 mehrstündige Gespräche statt, an denen teilweise mehrere Experten teilnahmen. In der Bundesrepublik wurden 16 Gespräche geführt; davon zehn bei NC- bzw. Werkzeugmaschinenherstellern und sechs mit Ingenieurwissenschaftlern. Im Rahmen einer mehrwöchigen USA-Reise fanden 17 teilweise sehr ausführliche Gespräche mit einem oder mehreren Experten statt; davon acht bei NC- bzw. Werkzeugmaschinenherstellern, sechs mit Ingenieurwissenschaftlern und drei mit Sozialwissenschaftlern. Hervorzuheben ist besonders, daß mit den als Erfindern der NC-Technik geltenden John T. Parsons und Frank Stulen, dem früheren Konstruktionschef in Parsons Betrieb, ein mehrstündiges Interview in Traverse City/Michigan geführt werden konnte.

Die Erhebungsarbeiten umfaßten aus arbeitsökonomischen Gründen im wesentlichen zwei relativ weit auseinanderliegende Phasen, Winter 1987/88 und Frühjahr/Sommer 1991. Die Interviews in den USA wurden im Mai 1991 geführt.

Die folgende Analyse und Interpretation der NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik beginnt mit dem Versuch, die Besonderheiten fertigungstechnischer Entwicklung im Kontext des säkularen Pro-

zesses der Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung genauer herauszuarbeiten und einige Konsequenzen der fortschreitenden Verwissenschaftlichung für die Fertigungstechnik zu bestimmen (Kap. II). Daran anschließend werden die Merkmale der NC-Technik als verwissenschaftlichte Technik genauer gefaßt, und es werden die empirisch-analytischen Kategorien für die Strukturierung des empirischen Materials herausgearbeitet und begründet; unterschieden wird dabei zwischen drei Entwicklungspfaden der NC-Technik: einem Entwicklungspfad weitreichender Automatisierung, einem Entwicklungspfad nur begrenzter Automatisierung und einem werkstattorientierten Entwicklungspfad (Kap. III). Damit wird zur empirischen Analyse der NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik übergeleitet (Kap. IV und V). Anschließend werden die institutionellen und sozioökonomischen Bestimmungsfaktoren der NC-Entwicklung wie der fertigungstechnischen Entwicklung generell in den USA und der Bundesrepublik diskutiert. Ihre Zusammenhänge werden als nationalspezifische Innovationsmuster verstanden. In den USA kann unterschieden werden zwischen einem zivilen Innovationsmuster, das Element des fordistischen Systems der Massenproduktion ist, und einem wissenschaftlich-militärischen Innovationsmuster als Teil der "permanent war economy" der USA der Nachkriegszeit, in dessen Rahmen die NC-Entwicklung verlief (Kap. VI). In der Bundesrepublik findet sich ein flexibles, marktbezogenes Innovationsmuster, das an sehr verschiedene industrielle Anwendungsbereiche rückgebunden ist (Kap. VII). Daran anschließend wird gefragt, welche Rückwirkungen der sozioökonomische Umbruch seit Mitte der 70er Jahre auf die verschiedenen Innovationsmuster hat, wobei nicht zuletzt die Frage nach den Gründen des Niedergangs des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus in den 80er Jahren eine wichtige Rolle spielt (Kap. VIII). Resümierend (Kap. IX) soll in theoretischer Perspektive der Frage nachgegangen werden, wie der wechselseitige Zusammenhang zwischen fertigungstechnischem Wandel und der sozioökonomischen Dynamik gefaßt werden kann: In welcher Weise die Innovationsmuster in diese Dynamik eingebettet sind und inwieweit die technische Entwicklung ihrerseits die ökonomische Dynamik beeinflußt.

II. Bedingungen und Verlaufsformen fertigungstechnischer Entwicklung

1. Strukturmerkmale technischer Entwicklung

In der neueren Literatur der Technikgeneseforschung wird der Begriff von Technik weit gefaßt. Danach reicht Technik von abgrenzbaren einzelnen Artefakten wie Automobilen, Werkzeugmaschinen oder Computern bis hin zu Systemen der unterschiedlichsten Art, in denen technische unmittelbar mit nicht-technischen Elementen verflochten sind. Als typische Beispiele für technische Systeme gelten etwa verkehrstechnische Systeme oder Systeme der Energieversorgung (Rammert 1991, S. 4 f.). Gemeinsames Merkmal dieser im einzelnen sehr unterschiedlichen Techniken ist, daß sie Mittel zum Erreichen eines bestimmten Zweckes und Resultat intentionalen menschlichen Handelns sind, das sich auf ihren Entwurf und ihre Entwicklung richtet (Paulinyi 1989, S. 14 f.). Der Prozeß von Technikentwicklung läßt sich dabei, resümiert man die neuere Literatur der Technikgeneseforschung, durch folgende grundlegende Merkmale bestimmen:¹

(1) Technikentwicklung ist durch einen stetigen und sich verstärkenden Prozeß der Verwissenschaftlichung in kognitiver wie institutioneller Hinsicht gekennzeichnet. Betraf dieser Prozeß seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts zunächst Technikentwicklung in den sogenannten "science based industries" wie Elektrotechnik und Chemie, so hat er in den letzten Jahrzehnten tendenziell auf sämtliche Bereiche von Technikentwicklung übergegriffen. Wissenschaft gewann dabei einen zunehmend zweckgerichteten Charakter und differenzierte sich in eine Vielzahl Disziplinen und Teildisziplinen aus. Eine Unterscheidung zwischen "reiner" Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung wird damit immer weniger möglich. Es etablierte sich auf diese Weise ein prinzipiell kontinuierlicher Wissensfluß von Grundlagenforschung über angewandte

1 Vergleiche die Zusammenfassungen bei Lutz (1990), Hack u.a. (1991) sowie Rammert (1991) und die dort angegebene Literatur.

Forschung und Technologie bis hin zur Entwicklung konkreter Techniken, ihrer Diffusion und Anwendung.²

(2) Technische Entwicklung entlang dieser Achse ist als vielstufiger Prozeß mit einer Vielzahl von überschüssigen Nutzungspotentialen auf den einzelnen Entwicklungsstufen zu begreifen. Grob unterschieden werden kann zwischen den Stufen einer Basisinnovation oder Invention, Innovation und Diffusion. Auf den verschiedenen Stufen findet nur eine partielle und selektive Ausschöpfung der prinzipiell möglichen Nutzungspotentiale von Wissenschaft und Technologie statt, und es setzen sich immer nur spezifische konkurrierende oder komplementäre Entwicklungslinien durch, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Basisinnovationen, die zu Sprüngen in der technischen Entwicklung führen, sind demgegenüber die Ausnahme. Bildhaft läßt sich ein solcher Entwicklungsprozeß als Baum mit seinen verschiedenen Haupt- und verzweigenden Nebenästen vorstellen.

(3) Voraussetzung und Folge der Stufigkeit von Technikentwicklung ist deren organisierter Charakter. Während in den frühen Phasen von Technikentwicklung technische Innovationen in der Regel das Werk einzelner Erfinder waren, die durch Grübeln, Basteln oder Probieren erstmalige oder neuartige Lösungen für anstehende Probleme fanden, wurde der Prozeß technischer Entwicklung im Zuge seiner Verwissenschaftlichung und Systematisierung zunehmend betriebsförmig organisiert. Forschung, Entwicklung und Konstruktion sind in institutionell unterscheidbare und spezialisierte Einheiten der unterschiedlichsten Art - von Forschungsinstituten bis hin zu Konstruktionsbüros - gegliedert. Die entsprechenden Arbeitsprozesse sind arbeitsteilig strukturiert, und sie werden in Hinblick auf

2 In der Grundlagenforschung werden die theoretischen Potentiale späterer Technikentwicklung generiert, während es sich bei angewandter Forschung um zielgerichtete FuE-Maßnahmen zur Entwicklung der technologischen Grundlagen einer bestimmten Technik handelt. Technologie meint dabei die für eine bestimmte Technik erforderlichen und systematisch entwickelten abstrakten Prinzipien und Verfahrensweisen. Sie stellt eine Art Bindeglied zwischen wissenschaftlich-theoretischen Grundlagen einerseits und Technikentwicklung und -anwendung andererseits dar und kann, zumindest in deutschsprachigen Ländern, in vielen Disziplinen mit den Ingenieurwissenschaften gleichgesetzt werden (Krohn, Rammert 1985; Radkau 1989, S. 40 ff.).

die Realisation bestimmter Ziele geplant und anhand vorgegebener Effizienzkriterien kontrolliert.³

(4) Damit einher geht die fortschreitende Ausdifferenzierung eines ausgebildeten und qualifizierten technischen Personals, das sich auf den verschiedenen Stufen mit Technikentwicklung befaßt. Das technische Personal gliedert sich entsprechend der Stufigkeit und betriebsförmigen Organisation des Entwicklungsprozesses von Technik, ist in verschiedene Tätigkeits- und Statusgruppen differenziert und vertieft damit den Prozeß der gesellschaftlichen Arbeitsteilung und fortschreitenden Trennung von geistiger und körperlicher Arbeit.

(5) Dieser Prozeß der Organisierung und Institutionalisierung von Technikentwicklung hat zur Folge, daß ein einmal eingeschlagener Pfad technischer Entwicklung ein Eigengewicht gewinnt. Gegenüber ihnen können sich Innovationen, die sich auf den Ersatz existierender Techniken richten, oft nur schwer durchsetzen. Denn auszugehen ist davon, daß die mit der Innovation und Diffusion einer bestimmten Technik sich etablierenden institutionellen Arrangements auf Dauer zu ihrer Verfestigung und Schließung neigen. Umschrieben wird dieser Tatbestand oft mit der Formel vom allgemein anerkannten "Stand der Technik" (Knie 1991), mit der bestimmte Standards für die Weiterentwicklung existierender technischer Lösungen wie insbesondere die Spielräume für die Akzeptanz neuer Basisinnovationen festgeschrieben werden. Hinter dieser Formel verbergen sich nicht nur abgesicherte Wissensbestände und durch Normen sanktionierte Entwicklungs- und Entscheidungsregeln, sondern auch das Beharrungsvermögen institutioneller Strukturen, Interessen, Orientierungen und Leitbilder entsprechender Communities und sozialer Akteure sowie in aller Regel massive ökonomische Interessen.

(6) Die Prozesse der Auswahl bestimmter Entwicklungsmöglichkeiten von Technik sind abhängig von einem ganzen Bündel sehr verschiedener arbeitsprozessualer, politischer, institutioneller und sozio-ökonomischer Faktoren, Kräfte und Interessen, die steuernd auf Technikentwicklung einwirken. Zu nennen sind hier einmal interne Strukturen des Prozesses von Technikentwicklung, der Amortisationsdruck der zur Entwicklung

3 Zur fortschreitenden Integration von Prozessen der Technikentwicklung in Unternehmensabläufe und dadurch ausgelöste organisationsstrukturelle Veränderungen vgl. zuletzt Bieber, Möll 1993.

notwendigen Investitionen, spezifisch verfügbares Know-how und damit zusammenhängende Leitbilder, Orientierungen und Interessen des technischen Personals und die Konstellation der unmittelbar am Entwicklungsprozeß beteiligten kollektiven Akteure. Zum anderen kommt aber auch externen, zumeist marktvermittelten Faktoren und Bedingungen eine wichtige Rolle bei der Selektion technischer Entwicklungen zu. Marktbeziehungen spielen einmal zwischen den Stufen des Prozesses technischer Entwicklung und den hier agierenden Institutionen eine Rolle, insofern als der Weg zu einer fertigen technischen Lösung oder einem funktionsfähigen technischen System über verschiedene Teilmärkte für Basistechnologien, Komponenten, Aggregate etc. führt; Markteinflüsse wirken aber insbesondere in der letzten Phase der Entwicklung zur "Produktionsreife", da das Produkt dann in der Regel als Ware auf einem spezifischen Teilmarkt angeboten wird und Käufer finden muß.

Naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten, technologische Prinzipien und stoffliche Bedingungen figurieren in diesen sozial bestimmten Prozessen technischer Entwicklung je nach technischer Entwicklungslinie als unterschiedlich bedeutsame Randbedingungen: Sie geben Spielräume und Grenzen für die Entwicklung vor, innerhalb derer zwischen alternativen Nutzungspotentialen gewählt werden kann und konkrete technische Systeme funktionsfähig entwickelt werden können. Sie sind aber auch veränderbar, insofern als sie selbst Gegenstand von Entwicklungsprozessen werden können. Dies gilt etwa für technologische Prinzipien im Sinne bestimmter konstruktiver Funktionszusammenhänge oder für stoffliche Bedingungen wie von Materialien oder Werkstoffen bestimmter Eigenschaften.

2. Die Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung

Als Hauptmerkmal des Entwicklungsprozesses moderner Techniken gilt seine fortschreitende Verwissenschaftlichung.⁴ Damit wird eine Form von

4 Vergleiche hierzu neben anderen in unterschiedlicher Akzentuierung die techniksoziologischen und technikhistorischen Studien wie: Ullrich 1977; Böhme u.a. 1978; Rammert 1983; Halfmann 1984; Hack 1988; Radkau 1989 oder zuletzt Böhle 1992. Besonders pointiert argumentiert in diesem Zusammenhang die klassische ökonomische Innovationsforschung, die von einer Achse "Science-Technology-Production" und der These eines "Technology-Push" ausgeht (hierzu Dosi 1982).

Technikentwicklung überwunden, die als vorindustriell und handwerklich bezeichnet werden kann. Wesentliches Merkmal dieser handwerklichen Technik war, daß sie zwar in Einklang mit naturwissenschaftlichen Gesetzmäßigkeiten stehen mußte, ihre Entwicklung jedoch ohne die systematische Kenntnis und die gezielte Nutzung solcher Gesetzmäßigkeiten betrieben wurde. Weiterhin wies handwerkliche Technik eine unmittelbare Verschränkung mit dem Zweck und der Struktur von Arbeitsprozessen auf, für die die Technik entwickelt wurde. Es kann daher von einer engen Bindung an handwerkliche Fertigkeiten und akkumulierte Erfahrungen sowie einem ständigen Probieren und Improvisieren, um ein Entwicklungsziel zu erreichen, gesprochen werden (Ullrich 1977, S. 53 ff.; Paulinyi 1989, S. 29 ff.).

Der Prozeß der Verwissenschaftlichung hingegen verändert den Verlauf von Technikentwicklung sowohl in kognitiver als auch in institutioneller Hinsicht grundlegend. Er bewältigt zuvor kaum lösbare Entwicklungsprobleme und schiebt ganz offensichtlich die Grenzen der technischen Möglichkeiten immer weiter hinaus; erzeugt werden jetzt technische Gegenstände, die mit handwerklichen Methoden nicht entwickelt und hergestellt werden konnten (Landes 1973, S. 19):

"Wissenschaftliche Analyse ist für die Lösung der technischen Entwicklungsprobleme wenn nicht eine notwendige, so doch die auf Dauer überlegene Strategie. Mit ihr kann die 'Black Box' von technischen Funktionszusammenhängen aufgebrochen werden und können die beteiligten Faktoren einer Kausal- und Elementaranalyse unterzogen werden. Sie kann theoretisch das erreichbare Optimum bzw. die Grenzbedingungen eines technischen Verfahrens bestimmen. Die Theorie liefert technische Prognosen, auch für nicht-lineare Veränderungen, vor denen praktische Faustregeln versagen. Sie erschließt technische Prinzipien, die durch keine mögliche Extrapolation aus bekannten Verfahren entdeckt werden können" (Böhme u.a. 1978, S. 363).

Verwiesen wird damit auf wichtige Merkmale der Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung (Ullrich 1977; Hack 1988; Böhle 1992; Schmiede 1992):

(1) Verwissenschaftlichung meint die Nutzung der Erkenntnisse und Methoden naturwissenschaftlicher Forschung, die sich seit der Renaissance herausgebildet haben und die ein Bild rationaler Weltauffassung konstituieren. Ihr Erkenntnisinteresse ist es, Naturzusammenhänge unabhängig

von historischen Einflüssen und Veränderungen auf invariante Gesetzmäßigkeiten und ihr Wesen zurückführen zu können.

(2) Grundlegend dafür ist die Analyse von Naturzusammenhängen mit Hilfe der Regeln der Mathematik. Die Gesetzmäßigkeiten physikalischer und organischer Gegebenheiten sollen formal-mathematisch gefaßt und es sollen damit exakte Aussagen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge möglich werden.

(3) Voraussetzung für solche "objektiven" Aussagen ist die Verschlüsselung der interessierenden Sachverhalte und die sie konstituierenden Faktoren in Informationen oder Daten, mit denen Störgrößen eliminiert und diese Sachverhalte unter festgelegten Randbedingungen abgebildet werden können. Informationen müssen gleichsam raum- und zeitlosen Charakter haben und einer problemlosen Quantifizierung zugänglich sein.

(4) Methodologische Basis hierfür ist das Experiment, mit dem die Komplexität natürlicher Zusammenhänge reduziert und störende Einflüsse und Zufälligkeiten beseitigt werden, um so die gesuchten Zusammenhänge "rein", d.h. jederzeit kontrollierbar der Analyse zugänglich machen zu können. Zwar definiert sich Wissenschaft damit als "Erfahrungswissenschaft", doch gelten unmittelbare menschliche Erfahrung und "sinnliche" Wahrnehmung nur als begrenzt nutzbar, da ihre Ergebnisse als ungenau und täuschungsanfällig angesehen werden.

Damit bildet sich eine Form von Technikentwicklung heraus, die sich vor allem durch die Verwendung naturwissenschaftlicher Methoden wie die experimentelle Variation von Sachverhalten, ihre Messung und Quantifizierung sowie objektivierende Beschreibung aufweist. Hervorstechende Merkmale sind außerdem die theoretisch geleitete Begründung und die Generierung technischer Mittel und Methoden aus naturwissenschaftlicher Erkenntnis und Theorie, die Theoretisierung und Systematisierung technischen Wissens und die Ausdifferenzierung und Entwicklung einer Vielzahl spezieller Theorien, die unmittelbar für Technikentwicklung genutzt werden können.

Dieser Prozeß der Verwissenschaftlichung basiert institutionell auf einer wachsenden Bedeutung und Größe wissenschaftlicher Einrichtungen sowohl außerhalb als auch innerhalb des industriellen Bereichs, in den

letzten Jahren schnell zunehmender staatlicher und privater FuE-Ausgaben und vor allem eines ständig steigenden Anteils akademisch-wissenschaftlich gebildeten Personals am technischen Personal wie auch an der Beschäftigtenzahl einer Volkswirtschaft insgesamt. Technikentwicklung wird vermehrt von kollektiven und individuellen Akteuren vorangetrieben, deren Bildung und Kompetenzerwerb vergleichsweise praxisfern erfolgt und deren Arbeitsprozeß von den Feldern der Technikanwendung separiert ist (z.B. Hack, Hack 1985; Hack 1988).

Seine Dynamik bezieht dieser Prozeß aus zwei miteinander verschränkten Wurzeln: Zum einen resultiert sie in ihren historisch frühen Phasen aus einer vergleichsweise autonomen, sich beschleunigenden Entwicklung der Naturwissenschaft, die sich dabei zunehmend auf die Verwendung technischer Geräte und apparativ vermittelter Analyse im Rahmen experimenteller Forschung stützt. Darauf gerichtete Technikentwicklung unterliegt unmittelbar wissenschaftlichen Kriterien und Anforderungen, wie sie etwa mit Eindeutigkeit, Präzision oder Vergleichbarkeit gefaßt werden können. Damit führen Interesse und Dynamik von Wissenschaft zu Techniken, für die es keine Vorbilder bei handwerklicher Technik gibt; zu nennen sind hier etwa technisch genutzte Laborphänomene wie Elektrizität, Magnetismus, Kernkraft oder chemische Kunststoffe. Zum anderen resultiert die Dynamik des Prozesses der Verwissenschaftlichung von Technik aus der engen Verschränkung mit der fortschreitenden Industrialisierung, da Technik zur zentralen Voraussetzung von Produktivitätssteigerungen aufrückt. Die Ausweitung der Produktion, die Konkurrenz um Rohstoffe und Energiequellen, sich durchsetzende Massenfertigung und Weltmarktkonkurrenz führen zu einem wachsenden industriellen Interesse an technischen Innovationen, die allein durch die forcierte Nutzung von Wissenschaft bewältigt werden können (Böhme u.a. 1973; 1978). Historisch gesehen vollzieht sich eine immer systematischere Nutzung von Wissenschaft und verwissenschaftlichter Technik durch ökonomische Interessen, die damit zur treibenden Kraft der weiteren Entwicklung werden (Brandt, Papadimitriou 1983).

Als strukturelle Voraussetzung hierfür gilt die "Affinität" zwischen der Logik kapitalistischer Produktion und der Logik der Verwissenschaftlichung.⁵ Die Prinzipien und Methodik moderner Wissenschaft, die auf eine

5 Zur Begründung und Ausführung dieser These vgl. ausführlich Ullrich 1977 oder zusammenfassend Schmiede 1983 und Böhle 1992.

Beherrschung stofflicher Gegebenheiten und Vorgänge unabhängig von historisch-konkreten Bedingungen, die Isolierung von Störgrößen, und die kontrollierte Synthese als relevant angesehener Wirkungsfaktoren hinauslaufen, entsprechen den Erfordernissen einer Organisation kapitalistischer Produktionsprozesse nach dem Modell rationaler Herrschaft im Sinne Max Webers. Die exakten Wissenschaften liefern die Grundlagen und Methoden für die Organisierung und Technisierung materieller Produktionsprozesse nach der Maßgabe sich ständig wiederholender und durch objektivierbare Regeln vorausbestimmbarer Abläufe; die Organisation des industriellen Produktionsprozesses wird nach dem Vorbild maschineller Abläufe gestaltet und über viele Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts lieferte das taylorische Programm der wissenschaftlichen Betriebsführung hierfür die Regeln und Methoden. Anvisiert werden damit sowohl die Anpassung und Unterwerfung menschlichen Arbeitsvermögens unter eine verwissenschaftlichte Technik als auch die Eliminierung menschlicher Arbeit überhaupt.

Diese wachsende Bedeutung von Wissenschaft für kapitalistische Technikentwicklung setzte sich historisch freilich nur schrittweise und in den Industriebereichen in verschiedenen Formen und unterschiedlicher Geschwindigkeit durch. Historisch lassen sich kognitiv und institutionell verschiedene Phasen der Entwicklung dieses Zusammenhangs ausmachen (Landes 1973; Krohn, Rammert 1985; Paulinyi 1989):⁶

Eine Vorphase ab der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts war durch einen Prozeß der Differenzierung von Wissenschaft und Technik gekennzeichnet, wobei Technik noch weithin an Erfahrung gebunden war, Wissenschaft indes zu der Entwicklung wissenschaftlich-technischer Instrumente und Verfahren führte. Darüber hinaus gab es einzelne Kontakte zwischen Wissenschaftlern und Erfindern bzw. Unternehmern in wissenschaftlich-technischen Gesellschaften vor allem in England. Weitere Ansatzpunkte der Vermittlung zwischen beiden Bereichen erfolgten über neue Maschinen, die von experimentell orientierten Erfindern entwickelt wurden. Als prominentes Beispiel dafür gilt die Entwicklung der Dampfmaschine, die weitgehend ohne systematische Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse, aber mit wissenschaftlichen Methoden stattfand und zusammen mit Werkzeugmaschinen zur technischen Basis der "großen Industrie" wurde. Im Bereich der industriellen Produktion zeichneten sich gegen Ende des 18. Jahrhunderts frühe Formen des präzisen Messens, der Einsatz von Meßgeräten

6 Zu berücksichtigen ist dabei, daß realiter technische Entwicklungen häufig auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen, die, wie am Beispiel der Chemie gezeigt werden kann, lange Jahrzehnte zurückliegen (Landes 1973, S. 475).

und erste Formen technisch exakter Zeichnungen ab, womit die ersten Schritte der Überleitung von Erfahrung und Empirie in Regelwissen eingeleitet wurden.

Eine erste Phase intensiverer Beziehungen zwischen den Bereichen von Wissenschaft und Technikentwicklung begann im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts. Seit dieser Zeit bildete sich mit der Dynamik kapitalistischer Entwicklung die fortschreitende Verschränkung von Wissenschaft und Technik heraus. Es finden sich erste Beispiele der Verwissenschaftlichung von Technik, und es ergaben sich zunehmend Chancen für die ökonomische Nutzung von Techniken, die im Rahmen der Sonderentwicklung der wissenschaftlichen Instrumente und Verfahren entstanden sind. Institutionell bildeten sich dauerhafte Formen der Kooperation zwischen Forschern und der Industrie, die von den aufkommenden systematischen industriellen Innovationsstrategien initiiert sind. Ein Beispiel hierfür ist die frühe Entwicklung der Chemischen Industrie, die insbesondere in Deutschland schon in den 30er und 40er Jahren des 19. Jahrhunderts unter dem großen Einfluß von Wissenschaftlern stand, so daß "man bei oberflächlicher Betrachtung von einer ökonomischen Ineffizienz sprechen konnte" (Landes 1973, S. 180).

In einer dritten Phase wurden die wechselseitigen Angebote und Nachfragen zwischen Wissenschaft und Technik systematisiert und dauerhafte Brücken geschlagen. Diese Phase begann in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und reichte bis in das beginnende 20. Jahrhundert hinein. Mit ihr verband sich das Aufkommen einer eigenständigen Industrieforschung im Rahmen der "science based industries", der Elektrotechnischen und Chemischen Industrie, in denen sich das Interesse an Einzelerfindungen und die Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse für bestehende Produktionsprobleme auf die Monopolisierung von Marktchancen durch systematische FuE-Strategien verlagerte. Vielzitiertes Beispiel ist hierfür das Aufkommen der Farbenindustrie in Deutschland. Darüber hinaus lassen sich aber noch eine ganze Reihe weiterer technischer Entwicklungen anderer Industriebereiche wie etwa die verschiedenen Verfahren der Stahlschmelze, vor allem der Siemens-Martin-Ofen, und Metallurgie oder auch die Entwicklung von Kraftmaschinen wie Turbinen und Verbrennungsmotoren nennen. Insbesondere die Entwicklung moderner Dampfturbinen erforderte "eine Kombination aller verfügbaren Hilfsmittel der Mathematik, der Naturwissenschaft und der Maschinenkonstruktion" (ebd., S. 303).

Als vierte Phase können die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts bis zum Beginn des Zweiten Weltkriegs angesehen werden. Diese Phase war gekennzeichnet durch einen ständig sich verbreiternden, intensivierenden und vor allem beschleunigenden "Ideenfluß von der Wissenschaft zur Ingenieurkunst und von dort zu den Unternehmen" (ebd., S. 397). Die Gegenstandsbereiche technischer Entwicklung verschieben sich in dieser Zeit in einem Maße, daß sowohl individuelle Erfinder als auch Empiriker und Praktiker gegenüber der industrialisierten und organisierten Entwicklungsarbeit zurücktraten. Als hervorragende Beispiele technischer Entwicklung dieser Phase können die moderne Nachrichtentechnik, die Röhre und später das Radio angesehen werden.

In einer letzten Phase schließlich entstanden im Verlauf des Zweiten Weltkriegs vor allem in den USA die wissenschaftlich-industriellen Komplexe, "big science", im Zusammenhang mit staatlich-militärisch geförderten Großprojekten. Tech-

nisch-wissenschaftliche Entwicklung überschritt in dieser Phase vielfach die einzelunternehmerische Finanzkraft, und es müssen völlig neuartige Probleme der Steuerung von Innovationsprozessen und der Abstimmung der beteiligten kollektiven Akteure bewältigt werden. Technische Entwicklung steht seitdem zunehmend im Kontext korporatistisch geplanter Wissenschaftspolitik und staatlicher Förderung.

Als ein vorläufiger Endpunkt dieses Prozesses kann die Entwicklung moderner Computertechniken angesehen werden. In diesen Techniken manifestieren sich die Bestimmungen verwissenschaftlichter Technik in besonders prägnanter Weise: Zum einen folgt die Auslegung und Realisation dieser Techniken direkt und bruchlos den Erkenntnissen der Informatik.⁷ Waren die Auslegung und der Betrieb von Computern in den 50er und 60er Jahren noch sehr abhängig von den physikalischen Einsatzbedingungen und begrenzten Leistungsfähigkeit der damaligen Hardware wie Röhren und Transistoren, so schiebt die Verfügbarkeit über hochintegrierte Bauelemente der Mikroelektronik mit dramatisch ansteigender Leistungsfähigkeit diese Grenzen weit hinaus. Damit kann die Auslegung dieser "Maschinen" in hohem Maße allein den wissenschaftlich erarbeiteten Erkenntnissen über Methoden der Verarbeitung von Daten folgen und stößt nur noch in - freilich häufig von der Wissenschaft selbst induzierten - Extremfällen an stofflich bedingte Grenzen der Realisierung.⁸

Zum zweiten gelingt es mit Hilfe von Computertechniken, die wissenschaftliche Abstraktion von konkreten und realen Sachverhalten gleichsam zu maschinisieren und damit auf ein qualitativ neues Niveau zu heben. Das heißt, der Vorgang der Verschlüsselung realer Zusammenhänge in

-
- 7 Unter Informatik bzw. Computerwissenschaften (Computer Science) wird in Anlehnung an gängige Definitionen die Wissenschaft von der systematischen Verarbeitung von Informationen - insbesondere der automatischen Verarbeitung mit Digitalrechnern - verstanden. Unterschieden werden kann dabei zwischen der theoretischen und technisch-praktischen Informatik (z.B. Goldschlager, Lister 1984). Letztere kann in Anlehnung an die obige Definition von Technologie auch als Computertechnologie bezeichnet werden. Computertechnik meint die konkret anwendbaren Rechner und Rechnersysteme.
 - 8 Böhme u.a. (1978, S. 372 f.) zufolge erreicht Technikentwicklung damit ein Stadium, in dem ihre Theorien selbst wiederum auf Naturwissenschaft zurückwirken, indem sie spezielle Naturtheorien zu liefern vermögen. Als Beispiele werden die formalen Techniktheorien wie Kybernetik und Informationstheorie angeführt, die nach ihrer Entwicklung und technologischen Anwendung in natürlichen Zusammenhängen wie der Biologie oder Physiologie Verwendung finden.

raum- und zeitlose Informationen und deren Verknüpfung nach formal-logischen Regeln wird selbst Gegenstand der Automatisierung. Die Absicht, in realen Gegebenheiten generell gültige Strukturen und Informationszusammenhänge zu identifizieren und diese wiederum zur modellhaften Darstellung und Simulation realer Zusammenhängen zu nutzen, kann mit Hilfe von Computertechniken jetzt in den verschiedensten sowohl naturwissenschaftlichen als auch sozialen Zusammenhängen sehr weitreichend realisiert werden. Technische Voraussetzungen hierfür sind die Speichermöglichkeiten auch umfangreicher Informationen und ihre Verarbeitung durch programmierte Operationen sowie die Kommunizierbarkeit von Informationen und Modellen durch elektronische Netzwerke (Schmiede 1992).

3. Probleme der Verwissenschaftlichung

Die fortschreitende Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung ist allerdings keineswegs als ein kontinuierlich verlaufender und neue wissenschaftliche und technologische Erkenntnisse jederzeit und bruchlos in Technik umsetzender Prozeß zu begreifen. Obgleich sich moderne Technik wissenschaftlich-formaler Methoden bedient und die Naturwissenschaften für Technikentwicklung unverzichtbar und bestimmend geworden sind, "... darf diese Affinität nicht davon ablenken, daß Erkenntnis und Produktentwicklung unterschiedliche Dinge sind und, richtig betrieben, unterschiedlichen Gesetzen folgen" (Radkau 1989, S. 42). Die grundlegende Differenz zwischen beiden Bereichen liegt darin begründet, daß sich Wissenschaft auf Erkenntnisgewinn und Wissenssteigerung richtet, während sich Technikentwicklung mit der zweckgerichteten Bewältigung praktischer Erfordernisse befaßt. Insofern zeichnet sich die "Vermählung" von Wissenschaft und Technik als komplexer und widerspruchsvoller Prozeß aus (Landes 1973, S. 302):

(1) Es erweist sich, daß Verwissenschaftlichung der Technikentwicklung zwei nicht vollständig ineinander aufgehende Verlaufsformen mit unterschiedlichen Prinzipien umschließt: Auf der einen Seite zielt Verwissenschaftlichung auf die Entwicklung von Theoriewissen, um deduktive Aussagen über Naturzusammenhänge treffen und daraus wiederum technische Lösungen und Konzepte generieren zu können. Auf der anderen Seite

geht es um die induktive Entwicklung von Regeln, d.h. die Systematisierung und Kategorisierung empirisch-technischer Erfahrungen und Kenntnisse mit dem Ziel ihrer nachträglichen Theoretisierung (Weingart 1976). Wichtige Voraussetzung hierfür war die Entwicklung der Methoden des präzisen Messens und der exakten Zeichnung. Historisch konnte sich damit die Technologie als (ingenieur-)wissenschaftliche Eigendisziplin gegenüber wissenschaftlichen Disziplinen wie Mathematik und Physik konstituieren. Kognitiv sind beide verschiedenen Formen der Verwissenschaftlichung freilich nur schwer voneinander zu trennen; faktisch verschränkten sich auf dem Feld der Technologie empirisch-technische Erfahrungsregeln unmittelbar mit dem Gesetzeswissen angewandter Wissenschaft. Institutionell sind allerdings zumindest in Deutschland beide Momente von Verwissenschaftlichung, wie die Differenzierung zwischen Naturwissenschaften und neuerdings Informatik einerseits und Ingenieurwissenschaften andererseits zeigt, bis heute weitgehend voneinander gescheiden.⁹

(2) Das Bild von einer Achse "Science-Technology-Production" und die Annahme, daß in historisch fortgeschrittenen Phasen primär Wissenschaft und die sich mit ihr verbindenden Triebkräfte die technische Entwicklung beeinflussen, sind in der unterstellten Eindeutigkeit irreführend, denn viele Ausgangsfragen und Probleme, die wissenschaftlich bearbeitet werden, waren ursprünglich technisch-praktische. Die hohe Bedeutung von Geräten und Apparaten für den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn hat die Konsequenz, daß sich naturwissenschaftliche, etwa physikalische Forschung auf Gegenstände bezieht, die selber technisch hergestellt sind oder nur mit technischen Präzisionsgeräten manipuliert werden können. Der Bau solcher Geräte oder Apparate folgt zwar wissenschaftlichen Vorgaben und Kriterien, ist streng genommen aber angewiesen auf technisch-handwerkliche Regeln, auf Können, empirische Erfahrung und Methoden; nicht zufällig spielt vermutlich bis heute die "Experimentierkunst" eine wichtige Rolle für naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinn (de Solla Price 1984, S. 13). Auch gewinnt naturwissenschaftliche Forschung nicht selten Fragen und Problemstellungen aus den Vorgaben, die technische Innovationen ihnen machen (Halfmann 1984, S. 75). Der Prozeß der Ver-

9 Darin drückt sich eine für Technikentwicklung relevante nationalspezifische Ausprägung des Verhältnisses von Wissenschaft, Technologie und Technik aus, auf die noch zurückzukommen ist.

wissenschaftlichung folgt in dieser Perspektive weniger seinen immanenten Kriterien und Prinzipien als vielmehr unmittelbar externen, technisch-praktisch orientierten Anforderungen.

Typische, problemlos ergänzbare Beispiele hierfür sind die Entwicklung der Thermodynamik in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts, die sich weniger am Entwicklungsstand der Physik als an den praktischen Problemen des Dampfmaschinenbaus orientierte. Beispiele sind die "Überlegenheit der Dampfmaschinenbauer gegenüber der thermodynamischen Theorie" (Landes 1973, S. 303) oder die Erfindung des Transistors, die die Disziplin der Festkörperphysik begründete (Rödel 1972, S. 120).

(3) Obgleich von hoher "methodologischer Äquivalenz" (Böhme u.a. 1978) differieren die verschiedenen Momente des Prozesses verwissenschaftlichter Technikentwicklung in Hinblick auf zentrale Methoden und Ziele des Vorgehens erheblich. Während Wissenschaft analytisch und reduktionistisch orientiert ist, ist Technik dagegen notwendigerweise synthetisch. Festmachen läßt sich diese Differenz an historisch eingespielten Differenzen wie zwischen analytischer und technischer Mechanik oder analytischer und synthetischer Chemie. Während in den Wissenschaften klare theoretische Erklärungen und idealisierte Modelle angestrebt werden, zwingen in der Technik die Zwecke der späteren Anwendung zur Komplexität und den Einbezug im voraus nicht kalkulierbarer Einflüsse und "Störgrößen" (Krohn, Rammert 1985).

(4) Grundsätzlich unterliegen Technik und Wissenschaft verschiedenen "Bewährungsregeln", die die Produktion von Wissen bzw. die Entwicklung von Technik regulieren, selektieren und strukturieren und die gesellschaftlich in unterschiedlichen Bereichen institutionalisiert sind (Weingart 1976, S. 394 f.). Wissenschaft richtet sich nach solchen Regeln, die mit theoretischer Relevanz, Verallgemeinerbarkeit, Innovativität von Erkenntnis und Universalität gefaßt werden können. Technische Entwicklung folgt Regeln und Kriterien wie praktische Nutzbarkeit, Funktionalität, Effizienz und Störungsfreiheit. Trotz zunehmender Anwendungsorientierung sind die Voraussetzungen von Wissenschaft in hohem Maße die Existenz immanenter Relevanzkriterien, Erkenntnisinteressen und spezifischer theoretischer und professioneller Standards sowie arbeitsprozesuale Autonomiespielräume, die Voraussetzungen für Kreativität und wissenschaftliche Produktivität sind. Wissenschaft ist prinzipiell in der Lage, Fragestellungen und Entwicklungsansätze aus sich selbst, d.h. aus wissen-

schaftlicher Erkenntnis heraus zu generieren (ebd.). Technische Entwicklung hingegen verläuft grosso modo in eher strukturierten, vorbestimmten und kontrollierten arbeitsprozessualen Kontexten und ihre Relevanzkriterien sind nicht immanenter Natur, sondern sie werden vom jeweiligen Anwendungs- und Nutzungskontext bestimmt (Krohn, Rammert 1985).

(5) Damit wird schließlich auf institutionelle und soziale Differenzen zwischen den mit Technikentwicklung befaßten sozialen Akteuren aus wissenschaftlich und anwendungsorientierten Zusammenhängen verwiesen. Wesentlich sind hierbei vor allem die Unterschiede, die aus dem verschiedenen gesellschaftlichen Status der Bereiche von Wissenschaft und Technik und der fortschreitenden Ausdifferenzierung des wissenschaftlichen wie des technischen Personals resultieren. Die damit verbundenen unterschiedlichen Handlungsstrategien, Interessen, Leitbilder und Orientierungen müssen im Verlauf von Technikentwicklung zu einer gewissen, vermutlich konflikthaft verlaufenden Abstimmung gebracht werden.

Insgesamt muß von einem mehr oder weniger ausgeprägten Spannungsverhältnis zwischen der Logik der Verwissenschaftlichung und den Erfordernissen praktischer technischer Anwendung ausgegangen werden, das dem Prozeß der Technikentwicklung seine spezifische Dynamik verleiht. Die auf Formalisierung, Modellierung und Beherrschbarkeit realer Gegebenheiten hinauslaufende Logik der Verwissenschaftlichung von Technik ist konfrontiert mit den Bedingungen technischer Praxis: der Komplexität und Kontingenz stofflicher, ökonomischer und sozialer Bedingungen bei der Anwendung und Nutzung von Technik. Daher bedarf die Umsetzung von wissenschaftlichen Erkenntnissen in technische Artefakte immer der Ergänzung und Korrektur durch Praxis und Erfahrung.

Auszugehen ist von funktional notwendigen Rückkopplungsprozessen zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung, in denen Erfahrungen und Informationen aus diesen verschiedenen Bereichen über Technik ausgetauscht und damit korrelierende, divergente Interessen abgeglichen werden. Entwickler werden auf diese Weise unter Umständen zur Modifikation, Weiterentwicklung oder gar grundlegenden Revision bislang entwickelter Techniken veranlaßt. Diese Rückkopplungsprozesse können dabei durch verschiedene Verlaufsformen und Abstimmungsmechanismen geprägt sein, die von rein marktförmigen über spezifische Formen kooperativer und kommunikativer Austauschprozesse bis hin zu hier-

archisch strukturierten Beziehungen zwischen Entwicklern und Herstellern als auch zwischen den verschiedenen Stufen innerhalb von Entwicklerorganisationen reichen.¹⁰

Dieses Spannungsverhältnis begründet sich keineswegs durch bisherige Defizite der Verwissenschaftlichung, die über kurz oder lang durch forcierte wissenschaftlich-technische Entwicklungsanstrengungen überwindbar sind, vielmehr ist davon auszugehen, daß es sich mit fortschreitender Technikentwicklung zwar verändert, doch auf je neuen Entwicklungsstufen von Technik neu ausprägt und reproduziert.¹¹ Der Prozeß der Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung kann als stufenförmig verlaufend angesehen werden: Er wechselt zwischen schon länger existierenden und häufig als "ausgereift" angesehenen technischen Lösungen und Innovationen. Erarbeitete Lösungen können unter bestimmten Bedingungen trotz möglicherweise vorhandener Anwendungsprobleme weiterhin genutzt werden, wobei durch Innovationen die vorhandenen Anwendungsprobleme zwar bewältigt, zugleich jedoch andere, bis dahin nur latent vorhandene oder neue Anwendungsprobleme aufgerissen werden.

Freilich ist davon auszugehen, daß sich das Spannungsverhältnis zwischen Verwissenschaftlichung und den Erfordernissen praktischer Technikanwendung je nach Entwicklungsphase von Technik und der Art der in Frage stehenden Technik sehr verschieden ausprägt. In den einzelnen Entwicklungsphasen zeigen sich Unterschiede dahingehend, daß in der Phase der Basisinnovation wissenschaftliche Kriterien wie vollständige Beherrschbarkeit und Berechenbarkeit sowie Erklärbarkeit und Modellbildung Priorität vor Praxiserfordernissen haben, die zunächst eher am Rande thematisiert werden; vorherrschenden Einfluß auf die Technikentwicklung haben wissenschaftliche Bewährungsregeln, und es kann von einem engen Zusammenhang von Wissenschaft und Technik gesprochen werden. Erst in der Phasen der Innovation und Diffusion spielen die An-

10 Ähnlich konzeptualisieren Asdonk u.a. (1991) Technikentwicklung als "rekursiven Prozeß" mit verschiedenen Ausprägungsformen, um vor allem die darin ablaufenden Mikroprozesse der Informationsgewinnung und des Informationsaustauschs der Analyse zugänglich zu machen.

11 Einen Hinweis auf diese, hier nicht genauer ausführbaren Zusammenhänge geben beispielsweise die völlig neuartigen Anwendungsprobleme hochautomatisierter und verwissenschaftlichter Systeme wie Kernkraftwerke oder computergesteuerte Flugzeuge (vgl. hierzu auch Moldaschl 1991).

passung neu entwickelter Systeme an praktische Anforderungen und ihre entsprechende Weiterentwicklung eine zunehmende Rolle, und der Kreislaufprozeß zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung entfaltet sich; Bewährungsregeln der praktischen Anwendung gewinnen Priorität, und Technikentwicklung verläuft nun relativ abgeschottet und unabhängig vom Wissenschaftsbereich (de Solla Price 1984, S. 3 ff.).

Auch je nach der Art der in Frage stehenden Technik spielen die Komplexität und Kontingenz stofflicher, ökonomischer und sozialer Anwendungsbedingungen eine sehr verschiedene Rolle.¹² Vermutlich existiert hier ein sehr weites Spektrum verschiedener Techniken, das auf der einen Seite von Techniken begrenzt wird, wo wissenschaftliche Erkenntnisse und die Bedingungen der Technikanwendung zusammenfließen. Dies ist beispielsweise im Bereich der Elektrotechnik mit hinreichend berechenbaren und standardisierten Anwendungsbedingungen der Fall. Anders gelagert ist der Fall bei der Gentechnologie und Festkörperphysik, wo technische Auslegung und wissenschaftliche Erkenntnis in hohem Maße deshalb zusammenfallen, weil hier die Gewinnung wissenschaftlicher Erkenntnisse gleichbedeutend ist mit Technikentwicklung; im Fall der Gentechnologie handelt es sich um Verfahrenstechniken, bei der Festkörperphysik um Informationstechniken wie dem Transistor (Hack, Hack 1985, S. 163 ff.). Die andere Seite des Spektrums wird vom Maschinenbau begrenzt, wo - wie im folgenden noch genauer zu zeigen ist - die Anwendungsbedingungen nur in engen Grenzen antizipierbar sind und wissenschaftliche Erkenntnisse kaum direkt in Maschinen und technische Anlagen umgesetzt werden können.

Ein besonderer Fall ist in diesem Zusammenhang die Militärtechnik, wo sich die Entwicklungsanstrengungen vor allem von sozialen und ökonomischen Restriktionen relativ unbehelligt auf die möglichst umfassende Beherrschung der technisch-funktionalen Anforderungen richten können.

-
- 12 Für die sozialwissenschaftliche Analyse von Technikgeneseprozessen und die Versuche, generelle Aussagen über Technikentwicklung zu gewinnen, sind die - im folgenden nur angedeuteten - Differenzen von erheblicher Bedeutung. So untersuchen eine ganze Reihe von Technikgenesestudien zwar nur spezielle Einzeltechniken, doch leiten sie daraus allzu vorschnell generelle Aussagen über Technikentwicklung ab, ohne systematisch die Unterschiede zwischen verschiedenen Techniken herauszuarbeiten (zuletzt z.B. Asdonk u.a. 1991). Dieses wäre vor allem auch in technologie- und steuerungspolitischer Perspektive (ein Fokus vieler solcher Studien) überaus relevant.

Die Verwissenschaftlichung der Technikentwicklung konnte sich - wie auch die Anfänge der NC-Entwicklung in den USA zeigen - daher im militärischen Bereich seit jeher weitreichend durchsetzen. Die in diesem Bereich gegebenen Chancen für "Frontforschung" und "Spitzentechniken" sind nicht zuletzt ein Moment für die hohe Attraktivität militärisch orientierter FuE-Arbeiten für ganze Generationen von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren.¹³

4. Die Besonderheiten von Fertigungstechnik

Auch Entwicklungsprozesse von Fertigungstechnik weisen strukturelle Besonderheiten auf, denen die Analyse Rechnung tragen muß. In einer allgemeinen (und sehr formalen) Begriffsbestimmung meint Fertigungstechnik alle technischen Artefakte und Systeme, die sich auf die Gewinnung und Verarbeitung von Stoffen, Energie und Informationen richten. Eingeschlossen sind dabei auch die Funktionen des Transports und der Lagerung bzw. Speicherung. Bei der Stoffverarbeitung spielt neben der Stoffumwandlung, allgemein als Verfahrenstechnik gefaßt, die Stoffformung, wie Umformen oder Spanen, allein schon quantitativ die größte Rolle, wobei wiederum die Metallbearbeitung durch Werkzeugmaschinen, vielfach als industrielle Basistechnik angesehen, einer der wichtigsten Technikbereiche ist (Paulinyi 1989, S. 17 ff.).

Die Besonderheiten von Fertigungstechniken begründen sich darin, daß sie als Produktionsmittel zentrales Element im Prozeß industriell-kapitalistischer Rationalisierung sind und sich unter seinen spezifischen Bedingungen "bewähren" müssen. Für den Prozeß von Technikentwicklung hat dies mehrfache Konsequenzen: Fertigungstechnische Entwicklung unterliegt einem ständigen Anwenderdruck auf Verbesserungen und Innovationen, weil dadurch Kosten verringert und die Produktivität gesteigert werden können. Entwicklungsprozesse von Fertigungstechnik sind daher auf ihren verschiedenen Stufen relativ direkt dem Einfluß von Anwenderinteressen und -problemen ausgesetzt, und es bestehen überaus enge

13 "Das theoretische Optimum ... kam vor allem dort zum Tragen, wo es um keinen Dienst am Menschen, sondern um Vernichtung von Menschen ging. Von Galilei bis Oppenheimer waren mathematisch-physikalische Vorgänge in Reinform besonders gut an Bomben zu studieren" (Radkau 1989, S. 42).

Kreislauf- und Rückkopplungsprozesse zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung.

Stets werden dabei fertigungstechnische Verbesserungen unter der Maßgabe des Rentabilitätskalküls durchgeführt, das auf die Minimierung von Innovationskosten und die Amortisierung vorhandener Maschinen und Anlagen drängt. Vorherrschend sind daher Prozesse "schleichender" Rationalisierung, die auf eine nur schrittweise und allmähliche Weiterentwicklung und Modifizierung technischer Anlagen und Systeme setzen. Jeder Betriebspraktiker kennt zwar eine Vielzahl von Innovationsdefiziten der Anlagen in seinem Betrieb, weiß aber zugleich, daß diese aufgrund laufender Produktionserfordernisse und Kostenüberlegungen frühestens erst mit der nächsten oder gar übernächsten größeren Umstellung beseitigt werden kann. Entwicklungssprünge oder "technologische Paradigmenwechsel",¹⁴ die durch die Nutzung von neuem wissenschaftlichen und technologischen Wissen oder grundlegend neuen industriellen Rationalisierungsstrategien angestoßen werden, sind daher eher die Ausnahme, und fertigungstechnische Entwicklung weist einen ausgeprägt inkrementellen Charakter auf. Das heißt, vorherrschend ist die nur schrittweise Weiterentwicklung existierender Techniken.¹⁵

Wie noch genauer auszuführen, ist ein typisches Beispiel für einen solchen fertigungstechnischen Paradigmenwechsel die Nutzung der Erkenntnisse der Informatik, der Computertechnologie sowie der Regelungs- und Steuerungstechnologie für die Entwicklung von NC-Steuerungen von Werkzeugmaschinen. Möglicherweise zeichnet sich auch die fertigungstechnische Entwicklung der letzten Jahre unter dem Einfluß als "systemisch" zu bezeichnender Rationalisierungsstrategien durch einen solchen Paradigmenwechsel aus (Kap. VIII, 5.).

Im Mittelpunkt des Kreislaufprozesses zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung steht die Maschinenbau- bzw. Werkzeugma-

14 Dieser Begriff stammt aus der neueren institutionell orientierten ökonomischen Innovationsforschung; technologisches Paradigma meint hier "... a model and a pattern of solution of selected technological problems, based on selected principles derived from natural sciences and on selected material technologies" (Dosi 1984, S. 83).

15 Dieser auch als kleinschrittig oder evolutionär zu begreifende Charakter von Technikentwicklung findet sich im gesamten Maschinenbau mit seinen sehr verschiedenen Fachzweigen und Produkten bis heute. Dies belegen nicht zuletzt die Befunde einer gerade abgeschlossenen Untersuchung über Innovationsprozesse im Maschinenbau von Kalkowski und Manske (1993).

schinenbauindustrie, die bis heute als ein Zentrum bei dem Erwerb und der Verbreitung neuer Fertigkeiten, Technologien und Wissens für die auf Maschinenproduktion basierenden Industriezweige angesehen werden kann; historisch kam daher bislang dem Maschinenbau eine strategische Rolle für den Prozeß der Industrialisierung zu (Rosenberg 1975, S. 224). Die Entstehung und fortschreitende Spezialisierung dieses Industriezweigs ist Resultat einerseits der wachsenden Nachfrage und Bedeutung von Maschinen und technischen Anlagen für die Industrialisierung, andererseits jedoch spiegelt sie auch die schnelle Zunahme von technischen Fertigkeiten sowie technischen und später ingenieurwissenschaftlichen Wissens wider. So waren in der frühen Phase der Maschinisierung industrieller Produktionsprozesse in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts in Großbritannien und auch in den USA Hersteller und Anwender von Fertigungstechniken vielfach identisch und benötigte Maschinen wurden von den Anwendern auf einer Ad-hoc-Basis in unmittelbaren Bezug zu Praxisproblemen hergestellt (ebd., S. 218 ff.). Wenige Jahrzehnte später gründeten sich - in den einzelnen Ländern in verschiedenen Etappen und zu unterschiedlichen Zeitpunkten - selbständige Maschinenbaufabriken; schrittweise und zeitlich ebenso verschieden fand dabei ihre Spezialisierung auf bestimmte Maschinen und Produktionsmittel, so auch die Herausbildung einer eigenständigen Werkzeugmaschinenindustrie, statt. In Deutschland verlief diese Entwicklung im wesentlichen in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts (Mommertz 1981, S. 111 ff.; Paulinyi 1989, S. 105 ff.). Gegen Ende des Jahrhunderts schließlich traten erstmals als weitere Akteure der fertigungstechnischen Entwicklung außerbetriebliche, staatliche oder auch private Entwicklungs- und Forschungsinstitutionen auf, und es bildeten sich die ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen des Maschinenbaus und später die Teildisziplin Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen heraus.¹⁶ Korrelat dieser Entwicklung sind die quantitative Zunahme technischer Angestellter und die Ausdifferenzierung und Spezialisierung ihrer Arbeitsprozesse (Wolf u.a. 1992, S. 44 ff.).

16 Innerhalb des Maschinenbaus als ingenieurwissenschaftlicher Disziplin sind diese Teildisziplinen nicht immer eindeutig abgegrenzt und einheitlich bezeichnet. In Anlehnung an Spur (1979, S. 25 ff.) wird im folgenden von der unmittelbar auf Fragen der Metallbearbeitung bezogenen Teildisziplin Fertigung und Werkzeugmaschinen und allgemeiner von Maschinenbau gesprochen.

Fraglos ist auch Fertigungstechnik von einer historisch fortschreitenden Verwissenschaftlichung geprägt, was sich deutlich am historischen Wandel der am Entwicklungsprozeß beteiligten Akteure und ihrer skizzierten Ausdifferenzierung zeigt. In Deutschland lassen sich historisch in erster Näherung verschiedene Phasen der Verwissenschaftlichung von Fertigungstechnik ausmachen. Sie setzt sich nur sehr zögernd durch und ist untrennbar verbunden mit dem Aufkommen und der Akademisierung der Ingenieurwissenschaften und der Etablierung der entsprechenden Ausbildungsinstitutionen. Die ersten Phasen dieses Prozesses waren dabei freilich mehr dem Statusinteresse der neuen Ingenieurs-Community als industriellen Interessen oder technischen Erfordernissen geschuldet (Spur 1979; 1991; König 1985; Paulinyi 1989; Radkau 1989):

Die ersten Schritte zur Verwissenschaftlichung finden sich in den Anfangsjahren der polytechnischen Schulen in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts, wo vor allem zu Zwecken der Lehre die Deskription und Klassifikation von Werkzeugmaschinen und ihrer Komponenten angegangen wurde. Geschaffen wurde das System der Mechanischen Technologie, das als Ordnungsprinzip praktisch bis in die Gegenwart Bedeutung beihält. Nicht zuletzt wurde damit eine Basis für die späteren Maßnahmen der Normierung und Standardisierung von Maschinenelementen geschaffen. Diese Vereinheitlichung von Teilen war von hoher Bedeutung für die industrielle Praxis, da sie als Voraussetzung für die Austauschbarkeit von Teilen und daher für die industrielle Praxis überaus relevant ist.

Der Bruch mit der reinen Deskription begann schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts, als der Karlsruher Maschinenbauer Redtenbacher mit seinen 1852 erschienenen "Prinzipien der Mechanik" eine theoretische Maschinenlehre konzipierte. Mit ihr sollte es möglich werden, Erfinden und Konstruieren deduktiv abzuleiten. Ein erster Höhepunkt der logisch-theoretischen Durchdringung des Maschinenbaus war Reuleaux Kinematik, d.h. die Lehre von den maschinellen Bewegungsmechanismen.

Nicht zuletzt aufgrund der umstrittenen praktischen Relevanz der ausschließlich theoretisch orientierten Ansätze wurden gegen Ende des Jahrhunderts die analytisch-mathematischen Methoden ergänzt um geometrisch-synthetische Methoden, in denen sich theoretischer und praktischer Maschinenbau verschränken sollten. Im Zuge des Ausbaus und der Konsolidierung der Technischen Hochschulen wurden damit die Grundlagen für eine Eigenständigkeit des Maschinenbaus als wissenschaftliche und zugleich praxisbezogene Eigendisziplin gelegt. Nach amerikanischen Vorbild wurden seit Anfang dieses Jahrhunderts an den Technischen Hochschulen Laboratorien eingerichtet, die im weiteren Verlauf zur wichtigen Voraussetzung für die Kooperation zwischen Maschinenbaubetrieben und den Hochschulen wurden.

Diese Entwicklung setzte sich im Verlauf dieses Jahrhunderts mit einer fortschreitenden Ausdifferenzierung und Spezialisierung des Maschinenbaus in die

verschiedensten Teildisziplinen fort. Verbunden damit sind, neben anderen, die bekannten Ingenieurwissenschaftler Schlesinger und Wallichs (Spur 1991, S. 424 ff.). In der ersten Hälfte des Jahrhunderts fand die Konsolidierung spezieller wissenschaftlicher Institute und Fachrichtungen für Werkzeugmaschinen, Fertigungstechnik und Betriebslehre statt. Insbesondere konzentrierten sich im ersten Drittel des Jahrhunderts die ingenieurwissenschaftlichen Anstrengungen auf die Zerspanungsforschung. In den 30er Jahren wurde die Regelungs- und Steuerungstechnologie von zentraler Bedeutung für die fortschreitende Automatisierung von Werkzeugmaschinen. In der Nachkriegszeit mündete dieser Prozeß der Verwissenschaftlichung in einem kontinuierlichen Ausbau und Ausdifferenzierung des ingenieurwissenschaftlichen Maschinenbaus in Teildisziplinen wie Konstruktionslehre und Automatisierungstechnik, die in der neueren Zeit besonders auch auf die Erkenntnisse der Informatik zurückgreift.

Mit dieser historischen Entwicklung verändert sich der Prozeß fertigungstechnischer Entwicklung:¹⁷

(1) Tendenziell erfolgt die Entwicklung von Fertigungstechniken in einer zunehmenden Distanz zu den Erfordernissen ihrer praktischen Anwendung. Sie findet immer stärker unter Laborbedingungen, etwa in wissenschaftlichen Instituten, statt, wobei die Beteiligung nicht nur akademisch ausgebildeten, sondern auch nicht maschinenbauspezifisch ausgebildeten Personals wie etwa Elektrotechniker oder neuerdings Informatiker eine zunehmende Bedeutung erlangt. Fertigungstechnische Entwicklung erhält damit vor ihrer praktischen Anwendung einen zunehmend längeren Vorlauf und erfolgt in ihren Anfangsphasen relativ frei von betrieblichen Anwendungszwängen.

(2) Der Prozeß der Entwicklung und Auslegung von Technik ist ungleich stärker als früher geprägt von der systematischen Nutzung abstrakten Wissens und durch den Bezug auf naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten; zu nennen sind hier mathematisches und physikalisches Grundlagenwissen, die Erkenntnisse der Regelungs- und Steuerungstechnologie, spezielle Fertigungstheorien wie Zerspanungstheorien, Theorien über Maschinenverhalten sowie Regeln und Systematiken der Maschinenauslegung und Konstruktion und schließlich insbesondere die Erkenntnisse der modernen Informatik. Der Entwicklungsprozeß basiert auf Berechnung,

17 Vergleiche hierzu und zum folgenden auch die Thesen von Böhle und Rose (Böhle 1992; Böhle, Rose 1992) über die Grenzen der Verwissenschaftlichung von Produktionsprozessen, die auf arbeitspsychologischen Befunden über die hohe Bedeutung von Erfahrungswissen in der automatisierten Produktion basieren.

Modellbildung und Simulation der antizipierten realen Abläufe. Abgesichert werden die Ergebnisse der Entwicklung durch Labortests und Prüfläufe, die die früheren Probeläufe bei Anwendern ersetzen. Empirisch greifbar werden solche Entwicklungsprozesse beim Einsatz von Computertechniken zur Berechnung, Auslegung und Konstruktion sowie Simulation technischer Systeme und von Alternativen ihrer Auslegung sowie im enorm steigenden Aufwand für Qualitätssicherung und Prüfung.

(3) Zugleich basiert fertigungstechnische Entwicklung auf einem immer umfassenderen "Set" von Regeln und Systematiken für die Maschinenauslegung und Konstruktion, mit denen empirisches Wissen und Erfahrungen objektiviert und einer methodischen Nutzung zugänglich gemacht werden; häufig zusammengefaßt in der Teildisziplin "Mechanische Technologie". Damit in Zusammenhang stehen vor allem auch die Standardisierung und Normierung von einzelnen Maschinenelementen und Baugruppen, wodurch Entwicklungsprozesse unabhängiger von spezifischen Erfahrungen, Konstruktionstraditionen u.ä. subjektiv-personellen Einflüssen werden.

Ohne Frage ist auch im Fall von Fertigungstechnik das Verhältnis von Wissenschaft und Technik in den einzelnen Entwicklungsphasen verschieden ausgeprägt: So sind institutionelle Distanz und der Einfluß wissenschaftlicher Kriterien und Methoden besonders in der Phase einer Basisinnovation, in der es um die Erarbeitung grundlegender Funktionszusammenhänge, die Verwendung neuer Stoffe und Materialien sowie die Umsetzung naturwissenschaftlicher und technologischer Erkenntnisse in neue Techniken geht, unabdingbar, doch betrifft diese Tendenz den Prozeß von Technikentwicklung insgesamt. Es verändert auch der Prozeß der Weiterentwicklung vorhandener Techniken seinen Charakter, indem einerseits die zunehmende Beteiligung nicht maschinenbauspezifisch ausgebildeten Personals neue Prozeduren der Abstimmung erfordert, andererseits die wachsende Bedeutung von Modellbildung und Simulation kooperative und personelle Abstimmungsprozesse unnötiger werden läßt. Zwar ist der Ausgangspunkt fertigungstechnischer Innovationen die Kenntnis der relevanten, durch Technik zu bewältigenden Anwendungsprobleme, doch entsprechend der Logik der Verwissenschaftlichung wird versucht, sämtliche hierbei virulenten Faktoren ex ante zu bestimmen und einer Kalkulation zugänglich zu machen.

Fertigungstechnik entwickelt sich dabei in Richtung einer wachsenden "Eigenfähigkeit" und Automatisierung, insofern als mathematisierte Modelle und die Simulation technischer Funktionszusammenhänge wichtige Elemente der technischen Anlagen selbst werden. Insbesondere eröffnet der Einsatz von Computertechnologien hier sehr weitreichende Potentiale. Genutzt als Steuerungstechniken von Maschinen und Anlagen bilden sie deren Funktion ab, optimieren und regulieren ihren Ablauf und steigern auf diese Weise den Grad ihrer Automatisierung. Damit verbunden sind Rückwirkungen auf die Auslegung konventioneller Maschinen- und Anlagenkomponenten, deren Leistungsgrenzen hinausgeschoben werden können. In Form von Organisationstechniken richten sie sich auf die Simulation, Abstimmung und Synchronisierung von Teilprozessen zu Gesamtprozessen der Produktion und objektivieren damit die in der Regel zuvor personell hergestellte und vermittelte Koordination arbeitsteiliger Prozeßfunktionen. Insgesamt entspricht dieser Logik fertigungstechnischer Entwicklung in technischer Hinsicht das alte ingenieurwissenschaftliche Ideal der "mannlosen Fabrik", in arbeitsorganisatorischer Hinsicht eine Trennung von Planung und Ausführung, insofern als allein durch eine vom realen Prozeß separierte Planung seine hinreichende ex ante Kalkulierbarkeit hergestellt werden kann.

Die in der Logik der Verwissenschaftlichung angelegte Entwicklungsrichtung der Technik kann jedoch nie vollständig realisiert werden und stößt unter Umständen schnell an Grenzen. Obgleich einerseits der Prozeß der Verwissenschaftlichung eingebunden ist in die ökonomische Dynamik industriell-kapitalistischer Entwicklung und Wissenschaft zur Produktivkraft avanciert ist, unterliegt die je konkrete Anwendung verwissenschaftlichter Fertigungstechnik vielfachen Begrenzungen. Ihre Ursachen liegen in den kontingenten Bedingungen industrieller Produktion, die in Widerspruch zu den betrieblichen Versuchen einer planmäßigen technisch-wissenschaftlichen Organisation des Produktionsprozesses geraten können: den virulenten und die Betriebe mit nur schwer antizipierbaren, ständig neuen Anforderungen konfrontierenden Bedingungen der Märkte; den Problemen der herrschaftlichen Strukturierung des Produktionsprozesses und den damit zusammenhängenden Unwägbarkeiten des Einsatzes von Arbeitskraft und schließlich der Komplexität der stofflichen Bedingungen der Produktion wie spezifische Eigenschaften von Maschinen und Materialien, die nur in Ausnahmefällen vollständig kalkulierbar sind; vielfach sind diese stofflichen Faktoren nicht nur ex ante unkalkulierbar, sondern

oft entziehen sie sich offenbar grundsätzlich der vollständigen Analyse und Berechnung.¹⁸ Sowohl in Anwenderbetrieben als auch bei Entwicklern werden die daraus resultierenden Probleme freilich häufig als ausschließlich technische und daher als technisch-wissenschaftlich lösbar angesehen, ohne ihren kontingenten und sozio-ökonomisch bestimmten Charakter zu erkennen.

Es entziehen sich daher die Anwendungsbedingungen von Fertigungstechnik zumeist einer vollständigen Überführung in objektivierte Regeln und modellhafte Abbildungen wie auch einer ausschließlich theoretisch deduzierten Vorausplanung und Kalkulation.¹⁹ Bis heute sind in den meisten Fällen zureichende Bedingung der Entwicklung und des Einsatzes von Fertigungstechnik Praxis und Erfahrung im Sinne von Empirie und Experiment, visuell begründbaren Konzepten und Analogieschlüssen oder auch das vielzitierte "Tacit Knowledge" der Arbeitskräfte, die im Produktionsprozeß Technik anwenden. Das heißt, im Prozeß fertigungstechnischer Entwicklung muß die Wissenschaft in spezifischer Weise immer mit Praxis und Erfahrung, im einzelnen freilich in verschiedener Weise, abgestimmt und korrigiert werden.

Auch im Fall von Fertigungstechnik wird damit kein bloßes Übergangsstadium bezeichnet, das einer Unzulänglichkeit des Prozesses der Verwissenschaftlichung und der verfügbaren technologischen Erkenntnisse und Mittel geschuldet ist. Vielmehr ist davon auszugehen, daß sich die Grenzen der Anwendung verwissenschaftlichter Technik zwar hinausschieben lassen, daß aber die "Sperrigkeit" industrieller Realität nicht nur erhalten bleibt, sondern bei der Entwicklung und Anwendung jeweils neuer Techniken stets erneut Probleme der Abstimmung mit den Anforderungen realer Produktionsprozesse entstehen. Unübersehbar ist dies bei der fertigungstechnischen Umsetzung der Erkenntnisse der Informatik und der Computertechnologie: Zwar wird mit dem Einsatz von Computertechniken und der wachsenden Fähigkeit von Fertigungstechnik zur Verarbeitung von Informationen tendenziell von der Komplexität und Besonder-

18 "Damit müssen wir uns als Techniker abfinden," so beinahe resignierend ein interviewter Ingenieurwissenschaftler.

19 Vergleiche hierzu etwa die schon ältere industriesoziologische Diskussion über die Probleme der (zeitökonomischen) Beherrschbarkeit des Produktionsprozesses und der Abstraktifizierung von Industriearbeit; Kritik an diesen Konzepten formuliert z.B. Bergmann (1989).

heit konkreter Anwendungszusammenhänge abstrahiert und die Technik gewinnt tendenziell universellen Charakter, doch betrifft dies in allererster Linie die Ebene der "Informationsform" von Produktionsprozessen, während davon die qualitativen Gegebenheiten industrieller Produktionsprozesse unberührt bleiben.²⁰ Daher bleibt auch der Einsatz fortgeschrittener rechnergestützter Fertigungstechniken immer gebunden an eine Vermittlung zwischen abstrakter Modellbildung und der realen Vielfalt und den Kontingenzen von Produktionsprozessen. Als zentraler Problembereich erweisen sich dabei die Diskrepanzen zwischen rechnergestützten Modellen und der Realität des Produktionsprozesses. Sie betreffen im einzelnen Aspekte wie die Gültigkeit der im Modell getroffenen Annahmen im konkreten Fall, die Bestimmbarkeit aller relevanten Einflußgrößen in quantitativer und qualitativer Hinsicht, die Kalkulierbarkeit ihrer Eigenschaften und die Komplexität der rechnergestützten Systeme, mit der sich ihre Störanfälligkeit offenbar dramatisch erhöht (Böhle 1992, S. 119 ff.).²¹ Um solche Anwendungsprobleme möglichst zu begrenzen, werden etwa bei der Einführung moderner rechnerintegrierter Produktionssysteme unter Umständen weitreichende und aufwendige Modifikationen des Systems und Anpassungen an konkrete Anwendungsbedingungen - von Experten vielfach als zentrale Schwachstelle dieser Systeme angesehen - vorgenommen, ohne daß freilich ständige erfahrungs- und empiriegeleitete Vermittlungsleistungen zwischen Modell und Realität im laufenden Prozeß überflüssig würden.

Die Bewältigung dieses Dilemmas, nämlich die immer erforderliche Vermittlung zwischen abstrakter Modellbildung und der Realität von Produktionsprozessen, bleibt offenbar ein Dauerproblem fertigungstechnischer Entwicklung, das durch den Einsatz von Computertechniken nicht nur reproduziert, sondern verschärft wird. Eine weitreichende Realisierung der der Logik von Verwissenschaftlichung immanenten Ziele fertigungstechnischer Entwicklung läßt sich daher immer nur um den Preis einer Auslegung von Fertigungstechnik angehen, die spezialisiert auf ein enges und in Hinblick auf seine Bedingungen und Einflußfaktoren eindeutig definierba-

20 Vergleiche Wolf und seine überzeugende Kritik an der in der Industriesozio-
logie weit verbreiteten Rede von der Computertechnik als "real-abstrakter"
Technik (Wolf 1992).

21 Nicht zufällig wird die hohe Störanfälligkeit komplexer Fertigungssysteme
seit längerem in den Ingenieurwissenschaften intensiv diskutiert (z.B. Milberg
1985).

res Anwendungsfeld ausgerichtet ist. Nicht zufällig betonen daher auch erfahrene Fertigungstechniker immer wieder, daß eine weitreichende Automatisierung selbst bei einem umfassenden Computereinsatz wenn überhaupt nur bei zeitlich und sachlich standardisierten Produktionsprozessen technisch und funktional möglich sowie vor allem auch kostenmäßig vertretbar sei. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Massenproduktion, wo im "Normalbetrieb" die stofflichen Bedingungen der Produktion, aber auch Probleme des Arbeitskräfteeinsatzes durch Standardisierung und Spezialisierung weitgehend kontrollierbar sind, so daß eine Technik Verwendung finden kann, die auf einen weitreichend automatischen Prozeß auf der Basis einer umfassenden Modellbildung und Simulation hinausläuft. Anders gelagert ist der Fall in der komplexen Einzel- und Kleinserienfertigung, deren Prozesse nur sehr begrenzt automatisierbar sind und wo "Lücken" der Prozeßbeherrschung sich aus ökonomischen und technischen Gründen nicht definitiv schließen lassen.

5. Fertigungstechnische Entwicklungspfade und Innovationsmuster

a) Entwicklungspfade

Dynamik und Richtung fertigungstechnischer Entwicklung hängen davon ab, in welcher Weise wissenschaftliche Entwicklungskriterien und -ziele mit den Erfordernissen industrieller Anwendung abgestimmt werden, und wie weit Anwendungsbedingungen ex ante kalkulierbar gemacht werden. Dies gilt für den generellen Entwicklungsverlauf von Fertigungstechnik. Dies gilt aber auch für je verschiedene Entwicklungspfade innerhalb ein und derselben Techniklinie.²² Wie später noch gezeigt wird, kann auf diese Weise etwa die NC-Entwicklung begriffen werden: Mit einem prinzipiell verfügbaren Wissen der Informatik, Computer- und Steuerungstechnologie wurde das Ziel der Automatisierung der Steuerungsfunktionen von Werkzeugmaschinen in verschiedener Weise realisiert, indem die

22 Dosi spricht von "technological trajectories", die sich innerhalb eines existierenden technologischen Paradigmas durchsetzen (Dosi 1982; 1984). An anderer Stelle wird von verschiedenen "Technikstilen" gesprochen (z.B. Hughes 1991).

Potentiale von Wissenschaft und Technologie teilweise sehr unterschiedlich mit den Anforderungen der industriellen Praxis abgestimmt wurden. Besonders in international vergleichender Perspektive lassen sich bei der NC-Technik sehr verschiedene Entwicklungspfade identifizieren.

Als generelle Merkmale fertigungstechnischer Entwicklungspfade können ein bestimmter Ausgangspunkt der Entwicklung in Form einer Basisinnovation, d.h. eines Prototypen, ein bestimmter Innovationsverlauf mit der Entwicklung der Prototypen zu anwendungsreifen Systemen (z.B. Nullserien) und schließlich der Diffusionsprozeß der Technik mit einer ständiger Weiterentwicklung, Anpassung und Optimierung der vorhandenen Technik (z.B. der Entwicklung neuer Systemgenerationen) angesehen werden.

Grundsätzlich bezeichnen verschiedene Pfade fertigungstechnischer Entwicklung spezifische Ausgangspunkte und voneinander unterscheidbare Wege der Technisierung gleicher oder ähnlicher Produktionsprozesse und Prozeßfunktionen. Die einzelnen Entwicklungspfade und die sie repräsentierenden Techniken sind in diesem Sinn funktional äquivalent. Ex ante läßt sich kaum entscheiden, welcher Pfad die effizientere Lösung - den häufig gesuchten "one best way" von Rationalisierung - repräsentiert.²³ Die Überlegenheit des einen oder anderen Pfades stellt sich, wenn überhaupt, immer erst ex post im Zusammenspiel mit einer Vielzahl sehr verschiedener technischer und nicht-technischer Bedingungen seiner Entwicklung und Anwendung heraus. Grundsätzlich ist allerdings davon auszugehen, daß eine solche Überlegenheit sich nicht auf eine rein ökonomische oder auch technische Effizienz reduzieren läßt, sondern sie ist ein komplexer, sozialen Einflußgrößen der verschiedensten Art unterliegender Sachverhalt. Insofern kann man nicht ausschließen, daß selbst in ein und derselben Bedingungskonstellation "verschiedene Wege nach Rom führen" (Kern 1989, S. 261 f.).

23 Effizienz ist von Effektivität zu unterscheiden: Der Begriff der Effektivität meint die Fähigkeit von Organisationen, bestimmte Ziele tatsächlich zu erreichen. Effizienz bezeichnet dagegen die Organisationsleistung zur Erreichung dieser Ziele im Hinblick auf einen alternativen Mitteleinsatz (z.B. Berger, Offe 1981, S. 41).

b) Nationalspezifische Innovationsmuster

Der jeweilige Verlauf von fertigungstechnischen Entwicklungspfaden ist als Resultat verschiedener kultureller, organisatorischer, institutioneller, politischer und sozioökonomischer Bedingungen und Faktoren zu begreifen. Sie prägen den je konkreten Prozeß der Abstimmung von Verwissenschaftlichung mit den Anforderungen industrieller Anwendung. Versucht man, diese Zusammenhänge in international vergleichender Perspektive zu analysieren, so ist zunächst davon auszugehen, daß Nationen unterscheidbare ökonomisch-politische Formationen darstellen und sich die Durchsetzung kapitalistischer Prinzipien an ihren je spezifischen normativen, politischen, institutionellen und sozialstrukturellen Bedingungen bricht; es kann von länderspezifisch unterscheidbaren Produktionsmodellen gesprochen werden (Kern 1989).²⁴ Daher ist weiterhin davon auszugehen, daß auch die fertigungstechnische Entwicklung in einzelnen Ländern durch ihre jeweiligen sozialen, ökonomischen und institutionellen Bedingungen und Faktoren beeinflußt wird.

Das Zusammenspiel je verschiedener gesellschaftlicher Strukturbedingungen mit den Besonderheiten fertigungstechnischer Entwicklung kann als nationalspezifisches Innovationsmuster begriffen werden, in dem bestimmte Entwicklungspfade von Fertigungstechnik generiert werden.²⁵ In Innovationsmustern bündeln sich folgende, analytisch zu trennende, Einflußgrößen auf den Prozeß fertigungstechnischer Entwicklung:

- Grundlegende Ausgangsbedingung fertigungstechnischer Entwicklung sind bestimmte, sich besonders durchsetzende Anwenderinteressen

24 Diese These kann im gegebenen Rahmen nicht weiter begründet werden. Verwiesen werden muß hierzu auf die gesellschaftstheoretische Diskussion darüber, ob nationalspezifische Divergenzen der industriell-kapitalistischen Entwicklung lediglich "Oberflächenphänomene" einer generell wirksamen und auf konvergente Entwicklungen hinauslaufenden kapitalistischen Dynamik sind oder ob sie auf grundlegende Unterschiede in der industriellen Entwicklung verweisen. Resümiert man dazu die neuere Literatur, so werden ausschließlich konvergenztheoretische Annahmen kaum noch vertreten (z.B. Lutz 1984; Piore, Sabel 1985; Kern 1989; Heidenreich, Schmidt 1991).

25 So wird auch im Rahmen der Weiterentwicklung des Konzepts der "technological trajectories" von "nationalen Innovationsstilen", die in Zusammenhang mit verschiedenen gesellschaftlichen Strukturbedingungen stehen, gesprochen (z.B. Nelson 1988).

und Anwenderprobleme, die als Anwendungsbezug fertigungstechnischer Entwicklung begriffen werden können. Dieser Anwendungsbezug steht seinerseits in engem Zusammenhang mit den je gegebenen, nationalspezifischen Industriestrukturen, ihren charakteristischen markt- und produktionsökonomischen Faktoren und ihren Wandlungsprozessen im Zuge sozioökonomischer Entwicklung.

- Der Kreislauf zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung läßt sich als Entwickler- bzw. Hersteller-Anwender-Beziehungen fassen, die sehr unterschiedliche Formen annehmen können (z.B. Döhl 1989). Sie umfassen auf der einen Seite den jeweiligen Anwendungsbezug mit den Strukturen, Problemlagen und Interessen maßgeblicher Anwenderbetriebe, auf der anderen Seite die Konstellation und die Strategien der Technikentwickler, in deren Zentrum der Werkzeugmaschinenbau steht. Von Wichtigkeit sind vor allem die länderspezifisch unterschiedlichen Interaktionsmechanismen zwischen den kollektiven Akteuren, die z.B. marktförmig, hierarchisch oder kooperativ bzw. netzwerkförmig sein können und damit jeweils verschiedene Konsequenzen für den Verlauf von Innovationsprozessen haben können.
- Ein wesentlicher Einflußfaktor ist schließlich das technische Personal - von Ingenieuren bis hin zu Produktionsarbeitern -, das die Technikentwicklung trägt und vorantreibt sowie seine Interessen, Entwicklungsziele und Leitbilder,²⁶ die es mit der Entwicklung verbindet. Die jeweilige Zusammensetzung des technischen Personals verweist auf seine gesellschaftlichen Reproduktionsmuster,²⁷ auf das jeweilige gesellschaftliche System von Forschung und Entwicklung und insbesondere die damit verbundene historische Bedeutung und das wissenschaftlich-akademische Gewicht der Ingenieurwissenschaften.

26 Der Begriff des Leitbilds bleibt in der einschlägigen Literatur bislang unscharf und seine Verwendung läßt eine Reihe von Fragen offen (zuletzt Dierkes u.a. 1992, S. 10 f.).

27 Unter der "sozialen Reproduktion des technischen Personals" verstehen Lutz und Veltz die Mechanismen und Strukturen, mit deren Hilfe technisches Personal ausgebildet, eingesetzt und im Generationswechsel "reproduziert" wird (1989, S. 239).

Die Ausprägung und das Zusammenspiel dieser Einflußgrößen konstituieren ein je spezifisches Verhältnis von Verwissenschaftlichung der Fertigungstechnik und den Anforderungen industrieller Praxis mit dem Resultat eines bestimmten Entwicklungspfad von Fertigungstechnik.²⁸ Wie an der Geschichte der NC-Entwicklung deutlich wird, können die Nutzung gleicher wissenschaftlicher Erkenntnisse und Technologien zur Technisierung ähnlicher und von ihren Grundstrukturen her vergleichbarer, nämlich metallbearbeitender und spanender, Produktionsprozesse in institutionell und strukturell unterschiedlichen Zusammenhängen zu verschiedenen technischen Entwicklungspfaden führen. Gewiß können sich Innovationsmuster im historischen Ablauf verändern und technische Entwicklungspfade sich verschieben, doch zeigen sie grosso modo über bestimmte historische Phasen hinweg gewisse einheitliche Muster, die aus einem hohen institutionellen Beharrungsvermögen und festgefügteten Interessenlagen resultieren.

28 Nicht berücksichtigt werden handlungsorientierte Bedingungen von Technikgenese, auf die sich beispielsweise die bekannten "sozialkonstruktivistischen" Interpretationskonzepte der Wissenschaftssoziologie (z.B. Pinch, Bijker 1984; Knorr-Cetina 1991) konzentrieren. Fraglos wird damit eine wichtige Dimension der sozialen Formung von Technik bezeichnet, die freilich bei der notwendigerweise primär strukturbezogenen Perspektive eines internationalen Vergleichs kaum thematisiert werden kann.

III. Entwicklungspfade der NC-Technik

1. Technische Merkmale

Der Begriff NC - Numerical Control bzw. Numerische Steuerung - bezeichnet im strengen Sinn die automatische Steuerung von Werkzeugmaschinen durch "Maßzahlen", die die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück definieren (z.B. Simon 1963, S. 320; Kief 1986, S. 29). Bei diesen Maßzahlen, wie sie etwa auf einer technischen Zeichnung zur Beschreibung eines Werkstücks zu finden sind, handelt es sich um Steuerungsanweisungen, die in die Steuerung eingegeben werden, wo sie mit Hilfe informationstechnischer Mittel nach mathematisch-logischen Regeln verarbeitet und in Steuerungsbefehle für die Maschine umgesetzt werden. Im praktischen Betrieb sind die Steuerungsanweisungen in einem Teile- oder Bearbeitungsprogramm mit alphanumerischen Zeichen zusammengefaßt, das nach genormten Regeln erstellt wird (Weck 1982, S. 123 ff.). Damit wird die direkte Handsteuerung ersetzt, wie sie an konventionellen Werkzeugmaschinen über die verschiedensten mechanischen oder elektrischen Bedienungselemente notwendig ist. Der Arbeitsvorgang der Maschinensteuerung wird damit automatisiert und die Informationen des Teileprogramms müssen in entsprechende Maschinenbewegungen und Bearbeitungsoperationen von Werkzeugen umgesetzt werden.

Um die historische Entwicklung dieser Technik mit ihren vielfältigen Voraussetzungen und Verzweigungen erfassen zu können, soll im folgenden NC-Technik relativ weit gefaßt werden: Unter NC-Technik soll sowohl die Verwendung digitaler als auch analoger Techniken zur Steuerung von Werkzeugmaschinen hauptsächlich auf der Basis elektrischer oder elektronischer Datenspeicher und Steuerungs- und Schaltkomponenten verstanden werden, die anstelle, aber auch in Kombination mit konventionell-manuellen, mechanischen, hydraulischen o.ä. Steuerungstechniken eingesetzt werden.

Damit steht die NC-Technik einerseits in der Kontinuität historisch schon lange zurückreichender Versuche, die Steuerung der Bearbeitungsprozesse an Werkzeugmaschinen durch mechanische oder elektromechanische Mittel wie Kurvenscheiben, Nockenleisten oder später Nachform-

steuerungen zu automatisieren (Schmid 1952). Andererseits unterscheidet sie sich jedoch von den meisten dieser konventionellen Automatisierungsverfahren dadurch, daß sie sich aufgrund ihrer leichten Umprogrammierbarkeit für die Automatisierung der wechselnden Klein- und Mittelserienfertigung eignet. Viele der bis heute gebräuchlichen Formen konventioneller Automatisierung - typisch etwa Drehautomaten - sind aufgrund ihres Umrüstaufwandes nur für die Großserien- und Massenfertigung nutzbar.

Obgleich nur schwer eindeutig festzumachen, kann daher als wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den verschiedenen Formen konventioneller Automatisierung und der NC-Technik die Flexibilität der Datenspeicher angesehen werden (Brödner, Hamke 1969, S. 608 f.).¹ Die verschiedenen Formen konventionell-analoger "Datenträger" wie Schablonen, Bohrlehren, Modelle, Kurvenscheiben u.ä. sind starr und nur schwer veränderbar, da auch geringe Veränderungen der Werkstückparameter in der Regel eine langwierige, oft komplizierte und vollständige Neuerstellung eines solchen Datenträgers oder -speichers erfordert. An Veränderungen von Werkstückparametern können die analogen wie vor allem die digitalen Datenspeicher der NC-Technik hingegen weit flexibler, d.h. leichter, schneller und vor allem auch partiell angepaßt werden, ohne daß unbedingt eine vollständige Neuerstellung notwendig wird. Im einzelnen können daher sowohl Steuerungen mit mechanisch-manuell einstellbaren Speichern wie Programmwalzen, Nockenleisten, numerischen Wälscheiben oder Dekadenschaltern, mit elektrischen Speichermedien wie Programm- oder Diodensteckern, als auch mit den bekannteren Speichermedien wie Magnetband, Lochstreifen oder integrierten elektronischen Speichern im weiten Sinn als NC-Steuerungen gefaßt werden.

Ein mit diesen verschiedenen Mitteln gespeichertes Bearbeitungsprogramm umfaßt zum einen Daten, die die Geometrie des Werkstücks bzw. die Werkzeugoperationen beschreiben und die zumeist als "Weginformationen" bezeichnet werden. Zum zweiten umfaßt es "Schaltinformationen", d.h. technologische Daten wie Maschinendrehzahl, Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs oder Kühlmittelschaltungen. Zum dritten sind häufig ergänzende Daten zur Anpassung eines Bearbeitungspro-

1 So bezeichnet Noble zutreffend die Entwicklung eines flexiblen, an wechselnde Produktionsbedingungen anpassbaren Datenspeichers als die zentrale technische Herausforderung der NC-Entwicklung (1979, S. 8).

gramms an eine spezifische Werkzeugmaschine (sog. Korrekturwerte wie Koordinatendaten, Werkzeugvoreinstelldaten etc.) erforderlich. Während die bloße Korrektur und Modifikation von Programmen meist nur die letzteren Daten und allenfalls einige Technologiewerte umfaßt, geht es bei der vollständigen Programmerstellung vor allem auch um die Festlegung der "Bearbeitungswege" und der Teilegeometrie.

Grundsätzlich läßt sich eine NC-Steuerung durch drei prinzipiell unterscheidbare Funktionszusammenhänge kennzeichnen: erstens die Erstellung des Steuerungsprogramms, zweitens die Speicherung der Programm-
daten und drittens die Umsetzung der Programm-
daten in Steuerungsim-
pulse für Maschinenbewegungen (Bild 1).

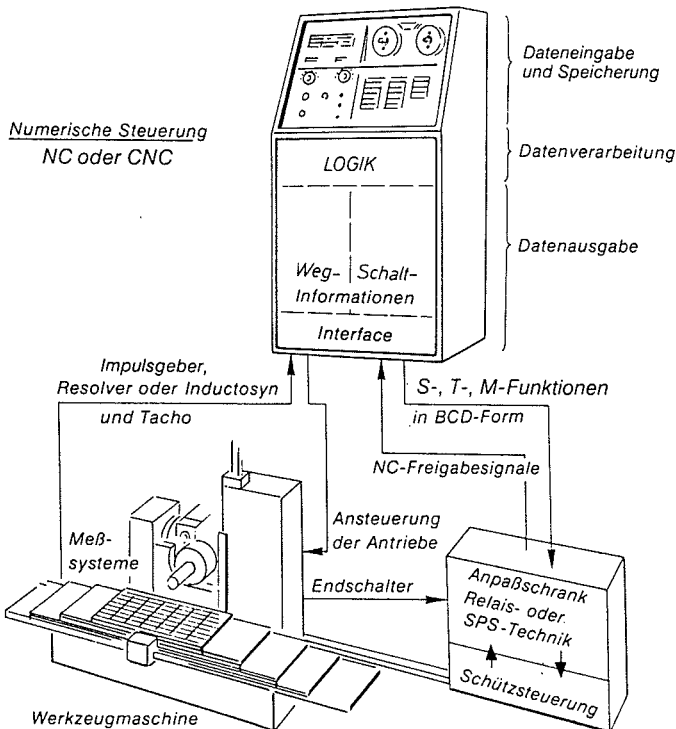


Bild 1: Prinzip einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine
(Quelle: Kief 1986)

Daraus ergeben sich weitreichende Konsequenzen für die Auslegung und Konstruktion von Werkzeugmaschinen. Ohne hier genauer darauf eingehen zu können, seien an dieser Stelle lediglich die wichtigsten dieser komplexen Zusammenhänge benannt: Erforderlich sind zum einen "Wegmeßsysteme", mit denen die Positionen und Verfahrswege der Maschinenkomponenten gemessen werden, um eine Bearbeitung entsprechend dem Teileprogramm zu realisieren; beispielsweise geht es dabei um Wege der Werkzeugschlitten oder die Bestimmung der Winkellage von Antrieben und Maschinentischen. Je nach den Leistungsanforderungen, die an eine NC-Maschine gestellt werden, kommen sehr verschiedene Prinzipien und technologische Möglichkeiten für die Meßsysteme in Frage.

Zum zweiten müssen die Antriebssysteme von Werkzeugmaschinen den geänderten Steuerungserfordernissen angepaßt werden, um die Anweisungen des Teileprogramms zuverlässig, genau und störungsfrei in Maschinenbewegungen umsetzen zu können. Dabei geht es sowohl um veränderte Hauptantriebe der Werkzeugmaschinen als insbesondere auch um die Vorschubantriebe, über die die Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeugen reguliert wird. Je nach erforderlicher Genauigkeit, Leistung und dem jeweiligen Bearbeitungsverfahren kommen hier sehr verschiedene Antriebsarten, etwa Schrittmotoren, Drehstrommotoren und Gleichstrommotoren mit verschiedenen Schalt- und Steuerungsprinzipien, zur Anwendung.

Schließlich werden die mechanische Konstruktion und die verwendeten Werkzeuge in vielerlei Hinsicht durch NC-Steuerungen bestimmt. Die jetzt möglichen hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen erfordern beispielsweise eine spezifische Dimensionierung und Auslegung von Maschinenführungen, Vorschubspindeln etc. Die Werkzeuge müssen etwa für einen automatischen Werkzeugwechsel und problemlose Austauschbarkeit sowie für eine hohe Belastbarkeit und Ausnutzung der Maschinenleistung ausgelegt sein (z.B. Weck 1982; Kief 1986).

Aufgrund ihrer Besonderheiten kann die NC-Technik als wichtiger Entwicklungsschritt auf dem Wege der Verwissenschaftlichung von Fertigungstechnik begriffen werden, allein mit konventionellen fertigungstechnischen Konzepten und dem herkömmlichen Ingenieurwissen des Maschinenbaus war sie nicht realisierbar. Besonders folgende Merkmale weisen auf den verwissenschaftlichten Charakter dieser Technik hin:

(1) Ihre Entwicklung war nur durch die systematische Nutzung wissenschaftlicher Erkenntnisse möglich; es handelt sich vor allem um das Wissen der Informatik in Hinblick auf die Grundlagen der Informationsübertragung und Informationsverarbeitung, wie etwa die digitale Rechenlogik sowie die Erkenntnisse der Steuerungs- und Regelungstechnologie in Hinblick auf die Umsetzung der in einem Programm codierten Informationen in Steuerungsbefehle und Maschinenbewegungen.

(2) Realisierbar wurde sie durch die Verwendung elektronischer Basistechnologien, Röhren, Transistoren, integrierte Schaltungen und schließlich hochintegrierte Schaltungen bzw. Mikroelektronik, deren Entwicklung unmittelbar mit der Anwendung physikalischen Grundlagenwissens verbunden war.

(3) Grundsätzlich basiert ihre Funktionsweise auf abstrakten Informationen über Produktionsprozesse sowie auf einer Modellierung von Bearbeitungsprozessen in von der Steuerung verarbeitbaren Programmen; moderne Steuerungen erlauben zudem eine umfassende Simulation der Bearbeitungsprozesse.

Schließlich lassen sich NC-Steuerungen prinzipiell auch relativ universell nutzen, und sie finden inzwischen weit über ihr ursprüngliches Anwendungsfeld im Bereich der spanenden Metallbearbeitung hinaus, beispielsweise bei Schweiß-, Montage-, Zeichen- und Meßmaschinen sowie zur Steuerung von Robotern, Verwendung.

2. Genereller Verlauf der Entwicklung

Im Rückblick läßt sich sagen, daß die NC-Technik mehrere Entwicklungsstadien durchlief, die die Entwicklung der Computertechnologie widerspiegeln. Auf der Basis der Röhren- und Relais-technologie der 50er Jahre und der Transistor- und Halbleitertechnologie in den 60er Jahren wurden "konventionelle" NC-Steuerungen entwickelt, bei denen die Funktionszusammenhänge der Steuerungen "fest verdrahtet" mit diskreten Bauelementen realisiert wurden. Für jedes Anwendungsfeld und Bearbeitungsverfahren wie Drehen oder Fräsen waren spezielle technische Steuerungslösungen erforderlich, und Änderungen und Erweiterungen der Steuerungsfunktionen waren nur mit aufwendigen Veränderungen an der Steuerungshardware realisierbar. Die Möglichkeiten einer Datenspeicherung direkt in der Steuerung waren begrenzt, in der Regel wurden die Programme auf Lochstreifen oder Magnetbändern gespeichert.

Parallel dazu existierte in den 50er und 60er Jahren eine ganze Reihe von Varianten, die die schon erwähnten mechanischen oder elektrischen Datenspeicher und Steuerungsmethoden teilweise ohne oder in Kombination

mit den frühen elektronischen Mitteln für eine Automatisierung von Werkzeugmaschinensteuerungen nutzte. Zu nennen sind hier etwa Nockensteuerungen mit Programmsteckern der verschiedensten Art oder Stecktafeln bzw. Kreuzschienenverteilersteuerungen (z.B. Weck 1982, S. 99 ff.; Kief 1986, S. 23).

Ab dem Beginn der 70er Jahren wurden zunehmend und später ausschließlich die Mikroelektronik mit Mikroprozessoren und hochintegrierten Halbleiterspeichern für die NC-Entwicklung genutzt. Sie erlaubten die Verwendung von frei programmierbaren Rechnern und umfangreichen Datenspeichern anstelle der bisherigen funktionsspezifisch ausgelegten Bauelemente und Hardwaresteuerungen. Möglich wurde die Realisierung von CNC-Steuerungen (Computerized Numerical Control) zunächst auf der Basis von Minicomputern, später von Microcomputern. Im Unterschied zu fest verdrahteten NC-Steuerungen können CNC-Steuerungen über unterschiedliche Systemprogramme flexibel an unterschiedliche Anwendungsfelder und Bearbeitungsverfahren angepaßt werden. Änderungen oder Erweiterungen des Funktionsumfangs können ohne wesentliche Veränderung der Hardware lediglich über eine Software-Anpassung realisiert werden. Die sich neu ergebenden Möglichkeiten der Datenspeicherung erlaubten jetzt eine direkte Speicherung der Bearbeitungsprogramme sowie die Verarbeitung umfangreicher Datenbestände in der Steuerung und damit eine Abkehr von den für Programmänderungen prinzipiell nicht zugänglichen externen Datenspeichern wie Lochstreifen oder Magnetbändern (Spur 1979, S. 248 ff.; Weck 1982, S. 147 ff.).²

Diese Basistechnologien ermöglichten eine ständige und insgesamt schnelle Weiterentwicklung der NC-Technik. Folgt man der ingenieurwissenschaftlichen Literatur, so lassen sich generelle Entwicklungstendenzen der NC-Technik erkennen (z.B. Simon 1963; 1971; Spur 1979; Weck 1982; Kief 1986): Betont wird zum einen die ständige Steigerung des Funktionsumfangs, der Flexibilität, der Zuverlässigkeit und der Leistungsfähigkeit der Steuerungen, wobei Preis und Kosten der Steuerungen ständig fielen (Bild 2).

-
- 2 Gleichwohl wird, der einschlägigen Fachsprache folgend, vereinfachend auch weiterhin der Terminus NC-Technik als Generalbegriff für diese Technik benutzt. Wenn es um Differenzen zwischen der fest verdrahteten NC- und der CNC-Technik geht, wird explizit darauf verwiesen.

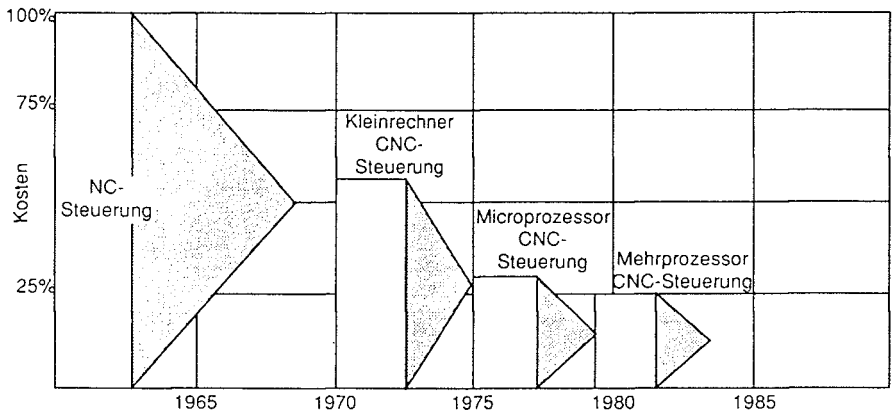


Bild 2: Abfolge der Steuerungsgenerationen
(Quelle: Spur 1991)

Betont wird zum zweiten, vor allem in Zusammenhang mit dem Aufkommen der CNC-Technik, die verbesserte und erheblich vereinfachte Programmierbarkeit der Steuerungen. Neben einer ganzen Reihe von Programmiererleichterungen wie die zunehmende Verwendung höherer Programmiersprachen und Unterprogrammtechniken wird insbesondere auf die immer leichtere direkte Programmierbarkeit der Steuerungen an den NC-Maschinen - die sog. "Werkstattprogrammierung" - verwiesen. Die fest verdrahtete NC-Technik und die Parallelsysteme mit elektromechanischen Speichern erforderten aufgrund ihrer begrenzten Speicher- und Datenverarbeitungsmöglichkeiten im Prinzip eine "Büroprogrammierung". Die Programme wurden werkstattextern in dafür spezialisierten Büros, mit entsprechenden zusätzlichen EDV-technischen Hilfsmitteln erstellt und später im Bearbeitungsprozeß schrittweise über Lochstreifen und ähnliche Datenträger in die Steuerung eingegeben. Diese Steuerungen boten nur begrenzte Möglichkeiten für die Speicherung und Verarbeitung von Programmen in der Steuerung selbst, wobei allerdings die tatsächlichen Möglichkeiten dieser Art bis heute bei den Experten umstritten sind. Hingegen ermöglichen die hochintegrierten Datenspeicher und Mikroprozessoren von CNC-Steuerungen prinzipiell eine Programmierung in der Werkstatt, indem über entsprechende Bedienungselemente und mit Hilfe verschiedener, in die Steuerung integrierter Programmierhilfsmittel die Programme direkt an der Steuerung erstellt werden können.

Mithin zeigten sich, folgt man nun der einschlägigen industriesoziologischen Literatur, in den verschiedenen Entwicklungsphasen der NC-Technik relativ gleichmäßige Muster der Programmierung und Bedienung der Steuerungen, die offenbar in hohem Maße technisch bestimmt waren: Die

USA			BRD		
Jahr	Stück	Anteil	Jahr	Stück	Anteil
1954-58	173	-	1957-62	30	-
1960	363	3,4	1960	-	-
1963	1.209	-	1963	68	-
1965	2.100	10,7	1965	338	-
1968	2.917	-	1968	490	7,2
1970	1.901	13,5	1970	762	7,2
1972	1.630	11,0	1972	622	7,8
1973	2.865	25,3	1973	808	9,2
1975	4.136	26,9	1975	1.006	10,4
1978	5.871	31,0	1978	2.249	18,6
1980	8.889	33,9	1980	3.009	18,8
1983	4.159	40,0	1983	7.484	36,5
1985	4.953	26,7	1985**	24.852	45,1
1988	7.035	34,7	1988	19.364	51,7
1989	8.184	36,0	1989	21.550	51,9
1990	7.927	40,0	1990	22.131	57,0
1991*	8.212	38,1	1991	19.145	54,4
<p>* 1991 vorläufig</p> <p>** Der erhebliche Sprung der Produktionszahlen zwischen 1983 und 1985 erklärt sich vor allem aus einem Wechsel der Erhebungsmethoden; bis 1985 handelt es sich um Verbandserhebungen des VDW, ab 1985 liegt die amtliche Produktionserhebung zu Grunde.</p>					
<p>Quellen: United States Department of Commerce 1969; NMTBA, versch. Jahrgänge; AMT 1992; VDW; eigene Berechnungen</p>					
Tabelle 1	Produktion von NC-Maschinen in den USA und in der Bundesrepublik in Stück und Anteil an der gesamten Werkzeugmaschinenproduktion in % des Gesamtwerts				

fest verdrahtete NC-Technik bot danach wenig direkte Programmiermöglichkeiten und legte eine von der NC-Maschine räumlich und zeitlich separierte Programmerstellung nahe, während die CNC-Technik zunehmende Gestaltungsspielräume für die Organisation der Programmierung bietet (Schultz-Wild, Weltz 1973; Mickler u.a. 1977; Bergmann u.a. 1986).

Dieser generelle Entwicklungsverlauf der NC-Technik spiegelt sich auch recht gut in den vorliegenden Produktions- und Verbreitungszahlen von NC-Maschinen wider. Danach läßt sich sowohl in den USA als auch in der Bundesrepublik ein zwar zeitversetzter, jedoch insgesamt sehr zögerlicher Anstieg der Produktionszahlen bis in die erste Hälfte der 70er Jahre erkennen. Erst ab Mitte der 70er Jahre, als die CNC-Technik verfügbar wurde, ist ein relativ deutlicher Anstieg der Produktion wie auch Diffusion der neuen Technik zu verzeichnen (Tab. 1, 2).

Wie noch genauer auszuführen ist, war eine Hauptursache für die bis Mitte der 70er Jahre nur sehr zögernde Verbreitung, daß die fest verdrahtete NC-Technik nicht nur überaus teuer und teilweise recht störanfällig war, sondern auch die Programmierung aufwendig und umständlich. Sehr viele potentielle Anwender dieser neuen Technik verzichteten daher auf ihren Einsatz (z.B. Gebhardt, Hatzold 1978). Erst mit der CNC-Technik

Jahr	USA	BRD
1968	0,5	0,5
1973	0,9	-
1976	1,7	1,4
1978	2,0	1,2
1979/80	3,8	2,2
1983	4,7	3,0
1985/86	-	5,7
1989	9,5	-
1991	-	11,9
Quellen: Schultz-Wild, Weltz 1973; Popken 1979; AM, November 1989; VDW; eigene Berechnungen		
Tabelle 2	Verbreitung von NC-Maschinen in den USA und in der BRD; ungefährender Anteil am Gesamtbestand von Werkzeugmaschinen in %	

konnten diese Anwendungsprobleme zunehmend überwunden werden, so daß ab der zweiten Hälfte der 70er Jahre sehr viel mehr Betriebe diese neue Technik zu nutzen begannen und sich ihr Einsatz sehr schnell ausweitete.³

3. Verschiedene Entwicklungspfade

Wie schon angedeutet (Kap. I, 3.), gab es in der Geschichte der NC-Technik divergierende Entwicklungen. Innerhalb des vor allem durch technische Merkmale beschriebenen Innovationsprozesses lassen sich deutlich unterscheidbare Entwicklungspfade der NC-Technik ausmachen: Die verfügbaren Potentiale der Informatik sowie der Steuerungs- und Computertechnologie wurden in verschiedener Weise mit den praktischen Erfordernissen industrieller Anwendungsfelder abgestimmt. Das bei der NC-Entwicklung grundsätzlich zu lösende Entwicklungs- und Anwendungsproblem bestand darin, bei der Programmierung des Bearbeitungsprozesses die sehr verschiedenen und kontingenten Bedingungen industrieller Produktionsprozesse in einem Modell zu antizipieren. Bei der Lösung dieses Problems können und wurden verschiedene Wege eingeschlagen. Von besonderer Bedeutung sind bei der spanenden Metallbearbeitung die stofflichen Faktoren von Bearbeitungsprozessen wie die Eigenschaften der verschiedenen Bearbeitungsverfahren, die Merkmale - Größen, Geometrien und Materialien - der Teile, unerwartete Material- und Maßvarianzen von Werkstücken sowie das nur schwer kalkulierbare Maschinenverhalten in thermischer und mechanischer Hinsicht. Des weiteren sind die organisatorischen Erfordernisse in Rechnung zu stellen, die vor allem das Problem betreffen, die sachliche Varianz und die zeitliche Reihenfolge der zu bearbeitenden Werkstücke in Hinblick auf eine möglichst effiziente Fertigung hinreichend genau planen zu können.

Je nachdem, in welcher Weise bei der NC-Entwicklung auf die Bedingungen realer Produktionsprozesse abgestellt und wie weit sie durch den Einsatz dieser Technik beherrschbar gemacht werden sollen, lassen sich Ent-

-
- 3 Zu berücksichtigen sind bei den, auf den ersten Blick sehr niedrigen Werten für den Bestand an NC-Maschinen in Tabelle 2 allerdings die bekannten Kapazitätseffekte von NC-Maschinen, die, je nach Ausführung, bis zu vier konventionelle Werkzeugmaschinen ersetzen können.

wicklungspfade mit NC-Steuerungen verschiedener Komplexität unterscheiden. Eine hohe Komplexität der Steuerungen kann als gleichbedeutend mit einer weitreichenden Nutzung der Potentiale von Wissenschaft und Technologie begriffen werden, während eine niedrige Komplexität auf eine selektive und begrenzte Ausschöpfung dieser Potentiale hinweist.

Ausgehend von der sozialwissenschaftlichen Diskussion um die mit dem Einsatz der NC-Technik verbundenen Veränderungen von Arbeitsprozessen, Tätigkeiten und Qualifikationen, die - wie die vorangegangenen Ausführungen schon deutlich gemacht haben (Kap. I) - in besonderem Maße von den Möglichkeiten der Programmierung der Steuerung abhängig sind, soll die Komplexität von NC-Steuerungen an folgenden Merkmalen festgemacht werden:

(1) Wichtigstes Merkmal ist der für die Programmierung der Steuerungen erforderliche Aufwand, dessen Höhe davon abhängt, wie weitreichend ein Bearbeitungsprozeß im voraus geplant und automatisiert werden soll. Ein zentraler Indikator hierfür ist die Auslegung der "Mensch-Maschine-Schnittstelle". Sie bestimmt darüber, ob eine aufwendige "Büroprogrammierung" erforderlich ist, bei der unter Umständen speziell ausgebildete Programmierer mit Hilfe von computertechnischer Unterstützung die Programme erstellen oder ob "Werkstattprogrammierung" durch das vorhandene Werkstattpersonal ohne weitere Zusatzeinrichtungen möglich ist. Während Büroprogrammierung prinzipiell auf eine möglichst umfassende Vorausprogrammierung und damit Automatisierung der realen Prozeßabläufe aus einer zeitlichen und sachlichen Distanz zur Werkstatt hinausläuft, ist Werkstattprogrammierung gleichbedeutend mit einer nur eingeschränkten Automatisierung der Arbeitsprozesse. Denn die Programmierung verschränkt sich in diesem Fall unmittelbar mit der real ablaufenden Bearbeitung, basiert auf Handlungs- und Entscheidungsspielräumen des Werkstattpersonals und beläßt vielfältige Lücken in Hinblick auf eine weitreichende ex ante Planung der Prozesse.

Zwischen den Polen einer ausschließlichen Büroprogrammierung und einer Werkstattprogrammierung liegen realiter allerdings viele Zwischenformen. Wie noch zu zeigen ist, ermöglichen für Büroprogrammierung ausgelegte Steuerungen in der Regel vielfältige Möglichkeiten des "Operatings" in der Werkstatt. Sie richten sich auf die Korrektur und Modifikation schon vorhandener bzw. im Büro erstellter Programme, die von der blo-

Ben Anpassung und Veränderung einzelner Daten wie Werkzeugkorrekturen oder Schnittgeschwindigkeiten bis hin zur Veränderung von ganzen Programmsätzen bzw. Werkzeugkonturen reichen können.

Werkstattprogrammierung kann in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand und der Auslegung von Steuerungen auf verschiedenem Wege erfolgen. Am gebräuchlichsten ist die sog. "Handeingabe" oder auch "Manual Data Input" (MDI), mit der ein ganzes Spektrum im einzelnen unterschiedlicher Programmierformen bezeichnet wird. Dieses Spektrum reicht von der satzweisen Eingabe zuvor erstellter kompletter Programme bis hin zur Programmerstellung an der Steuerung mit Hilfe von in die Steuerung integrierten Hilfsmitteln wie Unterprogrammtechniken, automatischer Datenberechnung, Bedienerführung über Bildschirme und schließlich der On-line-Übernahme von Teiledaten aus einem CAD-System der Konstruktion (CAD: Computer Aided Design). In die Steuerung eingegeben werden müssen dann nur noch bestimmte Parameter der Bearbeitung (Geometriedaten und Technologiedaten), die dann vom Rechner in Teilprogramme umgesetzt werden (Bild 3).

Von der Handeingabe zu unterscheiden ist schließlich das Playback-Verfahren, bei dem die Speicherung eines zunächst manuell gesteuerten Bearbeitungsprozesses vorgenommen wird, um für nachfolgende gleiche Teile eine automatische Bearbeitung zu ermöglichen.⁴

Ein weiterer Indikator für den erforderlichen Programmieraufwand ist, welcher Art die im Fall der Büroprogrammierung zum Einsatz kommenden computertechnischen Hilfsmittel, Programmiersprachen und Programmiersysteme, sind, und in welcher Weise diese Systeme auf die realen Bedingungen der Fertigung abgestimmt sind. Eine wichtige Rolle spielt hier beispielsweise die noch genauer zu erläuternde Differenz zwischen geometrie- und technologieorientierten Programmiersystemen (Grupe 1974).

4 Die technische Begrifflichkeit ist nicht immer eindeutig. So sprechen Experten in Zusammenhang mit Werkstattprogrammierung auch von "teach-in", wobei verschiedentlich damit Playback, manchmal die Handeingabe von Programmen bzw. Daten gemeint ist.

(2) Weiteres Merkmal der Steuerungskomplexität ist der Funktionsumfang und damit der Automatisierungsgrad von Steuerungen, der an zwei Indikatoren festgemacht werden kann: Zum einen geht es um die Steuerungsart, die darüber Auskunft gibt, wie kompliziert die Maschinenbewegungen sind, die von einer Steuerung reguliert werden können. Grob wird hier zwischen einfachen Punkt-, aufwendigeren Strecken- und komplizierten Bahnsteuerungen unterschieden. Bei Punktsteuerungen sind nur einfache Positioniervorgänge möglich, wie sie z.B. für die Bohrbearbeitung erforderlich sind. Das Werkzeug darf während des Positioniervorganges keinen Bearbeitungsvorgang ausführen. Bei den aufwendigeren Streckensteuerungen können die Werkzeugmaschinenachsen linear verfahren werden, wobei das Werkzeug eine Bearbeitungsoption ausführen kann. Solche Steuerungen eignen sich für einfache Dreh- und Fräsbearbeitungen. Mit Bahnsteuerungen können die verschiedenen beweglichen Achsen einer Werkzeugmaschine hingegen in beliebig funktional bestimmbar Kurven gesteuert werden. Bei einem Teil der Streckensteuerungen und bei Bahnsteuerungen sind in der Regel sog. "Interpolatoren" erforderlich, die in einem aufwendigen Rückkopplungsprozeß von Soll- und Ist-Daten den Bewegungsablauf der Maschine errechnen und regulieren. Bahnsteuerungen werden für komplizierte Dreh- und Fräsmaschinen sowie Bearbeitungszentren⁵ der verschiedensten Art eingesetzt (Weck 1982, S. 125 ff.) (Bild 4).

Zweiter Indikator für den Funktionsumfang einer Steuerung ist die Zahl der automatisch regulierbaren Bewegungsachsen einer Werkzeugmaschine, die von der Leistungsfähigkeit und Kapazität einer Steuerung abhängt. Eine Bewegungsachse bezeichnet die prinzipielle Richtung, in der die relative Bewegung des Werkstücks zum Werkzeug erfolgt. Normalerweise wird von drei rechtwinklig zueinander stehenden Achsen, x, y und z bezeichnet, ausgegangen, die durch zusätzliche rotatorische Achsen ergänzt werden können (Kief 1986, S. 516). Je mehr Achsen gleichzeitig an-

-
- 5 Bearbeitungszentren integrieren mehrere Bearbeitungsverfahren, insbesondere verschiedene Verfahren des Bohrens und FräSENS in einer Maschine und ermöglichen damit prinzipiell eine sog. Komplettbearbeitung von Teilen, was auf Werkzeugmaschinen mit nur einem Bearbeitungsverfahren nicht möglich ist. Der Rationalisierungseffekt von Bearbeitungszentren kann beträchtlich sein: Es reduzieren sich die Fertigungszeiten, da die bei spezialisierten Werkzeugmaschinen unvermeidlichen Zeiten für Zwischenlagerung und Transport sowie für wiederholtes Aufspannen von Werkstücken, Einrichten von Werkzeugen und Vorrichtungen entfällt.

gesteuert werden können, desto komplizierter können Werkzeugmaschinen und die zu bearbeitenden Werkstückkonturen sein.

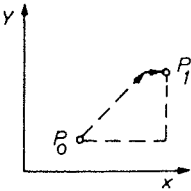
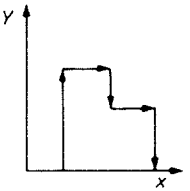
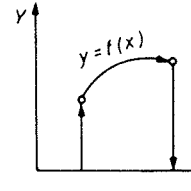
Steuerungsart	ohne Funktionszusammenhang		mit Funktionszusammenhang
	Punktsteuerung	Streckensteuerung	Bahnsteuerung
Werkzeugweg			
Werkzeug	beim Verfahren nicht im Eingriff	beim Verfahren im Eingriff	beim Verfahren im Eingriff
Anwendungs-Beispiele	Bohren, Punktschweißen	Drehen (zylindrisch), Fräsen (achsparallel)	Drehen, Fräsen, Brennschneiden

Bild 4: Steuerungsarten
(Quelle: Spur 1991)

Beide Merkmalsdimensionen, Programmierbarkeit und Funktionsumfang der Steuerung, hingen vor allem in den frühen Entwicklungsphasen technologiebedingt miteinander zusammen: Aufgrund der früheren technologischen Restriktionen für die Speicherung und Verarbeitung von Programmen in den Steuerungen war Werkstattprogrammierung häufig nur bei einem begrenzten Funktionsumfang der Steuerungen prinzipiell möglich, während dies bei einem hohen Funktionsumfang kaum oder nicht realisierbar war.

Dies war insbesondere bei Bahnsteuerungen der Fall, wo über eine hohe Zahl von Weg- bzw. Geometrieinformationen die Werkzeugkonturen bzw. Werkzeugwege berechnet werden mußten, die nur über einen externen Datenspeicher wie Lochstreifen oder Magnetband eingegeben werden konnten. Lediglich Schaltinformationen wie insbesondere die Vorschubgeschwindigkeit konnten, je nach Bauart einer Bahnsteuerung, direkt verändert werden. Es fehlten Kleinrechner oder die späteren Mikroprozessoren und für größere Datenvolumen geeignete Speicher. Anders verhält es sich hingegen bei einfacheren Punkt- oder Streckensteuerungen, wo sich von Anbeginn der Entwicklung an größere Möglichkeiten für Werkstattprogrammierung eröffneten. Denn bei diesen Steuerungsarten waren nur wenige Weginformationen notwendig, und es überwogen Schaltinformationen, die sich als relativ leicht direkt einbaubar und speicherbar erwiesen, da sie entlang vorgegebener Werteskalen oder durch einfaches Ein- oder Ausschalten bestimmbar waren (Simon 1971, S. 32 ff.).

Entlang dieser beiden Merkmalsdimensionen lassen sich analytisch mehrere Entwicklungspfade der NC-Technik unterscheiden. Zunächst läßt sich das Feld möglicher Entwicklungsverläufe durch zwei deutlich divergierende Entwicklungspfade begrenzen. Ihre Unterscheidung spiegelt die Breite der vor allem in internationalen Vergleichen vorfindbaren Entwicklungsverläufe der NC-Technik wider, und sie findet sich bestätigt durch eine Beobachtung von Simon,⁶ der schon in den frühen 60er Jahren auf verschiedene Entwicklungstendenzen bei der NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik hinwies. Er unterschied zwischen "Hochproduktivmaschinen ... mit immer stärker werdender Verkettung mit innerbetrieblichen Informationsflüssen und deren mehr oder weniger stark automatisierter Verarbeitung" und dem Bau von "Einfachmaschinen", die prinzipiell in der Werkstatt von Facharbeitern programmiert werden könnten.⁷ Die verschiedenen Entwicklungspfade der NC-Technik lassen sich wie folgt unterscheiden:

(1) Der erste Entwicklungspfad der NC-Technik ist von einer hohen Komplexität gekennzeichnet, und er richtet sich auf eine weitreichende Automatisierung von Bearbeitungsprozessen. Dieser Entwicklungspfad der NC-Technik zielt auf die Steigerung der "Eigenfähigkeit" technischer Anlagen und die Beherrschung möglichst sämtlicher Bedingungen des Produktionsprozesses und die Substituierung personeller Arbeitsleistung nicht nur in ausführender, sondern auch in planender und steuernder Hinsicht; Maschinenarbeit kommt dabei prinzipiell nur noch die Funktion einer Restgröße zu. NC-Steuerungen, die diesem Pfad folgen, erfordern Büroprogrammierung und zeichnen sich in der Regel durch einen hohen Funktionsumfang aus, um möglichst viele Bearbeitungsoperationen automatisch ausführen und Bearbeitungserfordernisse technisch beherrschen zu können; komplementär dazu sind die Möglichkeiten für Werkstattprogrammierung auf ein Minimum beschränkt. Da allerdings die Realisierung einer weitreichenden Automatisierung technisch und auch ökonomisch kontrollierbare und fixierte Anwendungsbedingungen erfordert, sind

6 Wilhelm Simon, Professor für Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Berlin, galt in den 60er und frühen 70er Jahren als einer der renommiertesten NC-Experten in der Bundesrepublik.

7 Diese Unterscheidung wurde in Anschluß an die Ergebnisse der Studienreise einer Gruppe westdeutscher NC-Experten in die USA 1963 herausgearbeitet (Simon 1964, S. 48 ff.). Auf die Ergebnisse dieser Studienreise wird noch zurückzukommen sein.

Steuerungen dieses Entwicklungspfads nur unter spezialisierten industriellen Produktionsbedingungen nutzbar.

(2) Deutlich davon unterscheiden läßt sich ein weit weniger komplexer, werkstattorientierter Entwicklungspfad der NC-Technik. Steuerungen dieses Pfads zielen auf eine möglichst hohe technische und organisatorische Einsatzflexibilität, indem sie weite Möglichkeiten des direkten personellen und qualifizierten Eingriffs in die computergestützte Maschinensteuerung eröffnen. Zentrales Merkmal solcher NC-Steuerungen ist ihre Werkstattprogrammierbarkeit und ein häufig nur begrenzter Funktionsumfang. Obgleich mit Steuerungen dieses Entwicklungspfades gleichfalls zuvor manuell von Maschinenarbeitern ausgeführte Steuerungsfunktionen automatisiert werden, bleiben Qualifikationen und Erfahrungen menschlicher Arbeit gleichsam unverzichtbares Komplement und Funktionsvoraussetzung des Technikeinsatzes. Diesen Entwicklungspfad bestimmende Kriterien richten sich auf eine möglichst problemlose, schnelle und kostengünstige Anwendbarkeit von Steuerungen unter wechselnden und kontingenten Bedingungen von Produktionsprozessen.

Zwischen diesen beiden beträchtlich divergierenden Entwicklungspfaden liegt "ein breites Band von Zwischenlösungen" (Simon 1964), das in einem dritten Entwicklungspfad zusammengefaßt werden soll, um es gleichfalls der Analyse zugänglich zu machen:

(3) Die NC-Technik zielt auf die Automatisierung von Bearbeitungsprozessen auf dem Niveau einer nur eingeschränkten Komplexität. Hauptmerkmal dieses Entwicklungspfades ist eine nur begrenzte Automatisierung der Steuerungen. Sein Ausgangspunkt ist die Erfahrung, daß beim Einsatz von Fertigungstechnik eine maximale Automatisierung aufgrund der kontingenten Bedingungen des industriellen Produktionsprozesses sowohl technisch als auch zu vertretbaren Kosten nur in Sonderfällen möglich ist. Dies hat zur Folge, daß NC-Steuerungen neben einer häufig nur begrenzten Komplexität gewisse Möglichkeiten direkter personeller Eingriffe in den automatisierten Ablauf vorsehen. Maschinenarbeit ist hier mithin ein funktionsnotwendiges Komplement zur Automatisierung von Bearbeitungsprozessen.

In der Realität sind die Übergänge zwischen diesen verschiedenen Entwicklungspfaden fließend. Ihre analytische Unterscheidung soll jedoch die

folgende Untersuchung der NC-Entwicklung strukturieren und zugleich die Bestimmungsfaktoren der Technikentwicklung einer Analyse zugänglich machen.

IV. NC-Entwicklung in den USA

1. Konzentrierung auf weitreichende Automatisierung

Der Entwicklungspfad mit dem Ziel weitreichender Automatisierung findet sich in den USA. Uneingeschränkt gilt dies für die erste Entwicklungsphase der 50er und frühen 60er Jahre. Aber auch noch bis in die 70er Jahre hinein bleibt dieser Entwicklungspfad vorherrschend. Diese, im folgenden genauer zu belegende These bestätigt die Befunde der schon erwähnten frühen Studienreise westdeutscher NC-Experten in die USA Anfang der 60er Jahre (RKW 1964; Simon 1964).

a) Basisinnovation am MIT

Der Prototyp von NC-Systemen weitreichender Automatisierung wurde im September 1952 am Servomechanism Laboratory (Servo Lab) des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge/Massachusetts der Öffentlichkeit vorgestellt. Es handelte sich dabei um eine dreiachsenbahngesteuerte Vertikalfräsmaschine, deren außerhalb des Maschinenbereichs codiertes Programm über Lochstreifen in eine Digitalsteuerung eingegeben wurde. Die zentralen Komponenten der Anlage waren die Steuerung, damals "director" genannt, und die Werkzeugmaschine: Die Maschine war eine um Servoantriebe ergänzte und modifizierte Cincinnati Hydrotel aus staatlichen Beständen; der "director" war ein Spezialcomputer, der digitale Bearbeitungsdaten des Lochbandes in analoge Signale zur Maschinensteuerung umwandelte. Informationstechnische Basis dieses Systems waren elektronische Schaltungen mit Röhren und Relais (Reintjes 1991, S. 48 ff.); (Bild 5).

Potentielles Einsatzfeld für diese neue Fertigungstechnik war die Flugzeugindustrie, wo mit der Entwicklung neuer militärischer Hochleistungsflugzeuge schwierige Bearbeitungsprobleme auftraten; typisch hierfür waren die Herstellung komplizierter, räumlich gekrümmter Flächen für Profilbauteile und die Fertigung besonders großer, geometrisch allerdings relativ einfacher Integralbauteile aus neuen Werkstoffen wie speziellen Alu-

miniumlegierungen (Stöckmann 1964). Es handelte sich dabei um Probleme der Herstellung von komplexen Teilekonturen und weniger um Probleme der Bearbeitungstechnologie. Solche geometrischen Bearbeitungsprobleme waren mit konventionellen Steuerungstechniken, wie dem damals vorherrschenden Kopierfräsen, kaum noch zu beherrschen, weil die Fertigung der erforderlichen komplizierten Schablonen rapide ansteigende Kosten verursachte.

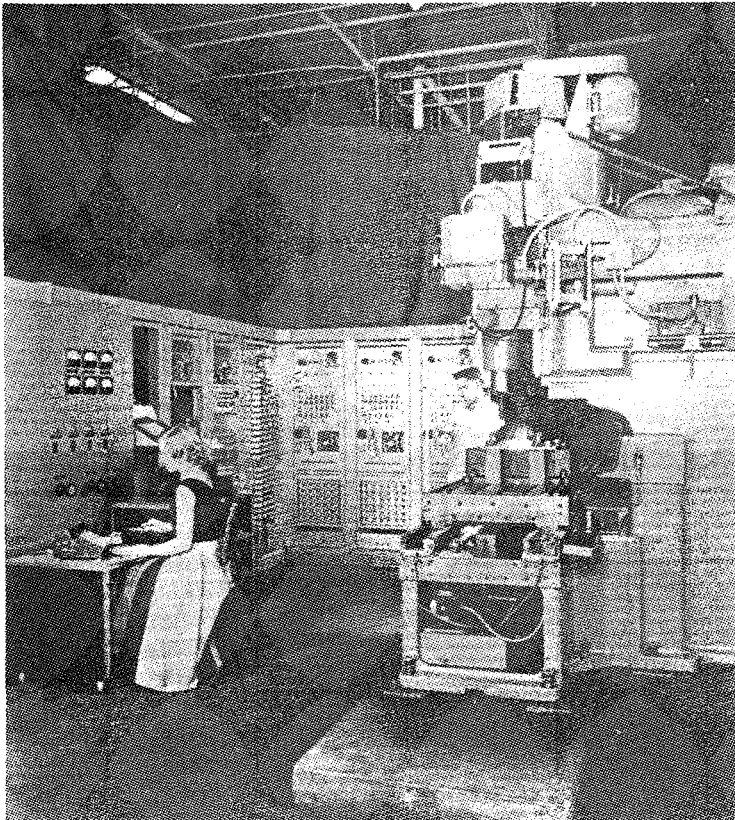


Bild 5: Vertikalfräsmaschine Cincinnati Hydrotel mit MIT NC-Steuerung 1952

(Quelle: Noble 1984)

Um diese Fertigungsprobleme zu bewältigen, war die Entwicklung komplexer und aufwendiger Steuerungen, nämlich Bahnsteuerungen, notwendig, die in der Lage waren, das Werkzeug einer Profilbearbeitungsmaschine entlang einer mehrdimensional geformten Bahn zu steuern. Die Programmierung dieser Steuerung war zeitaufwendig und komplex und erforderte einen zeitlich und räumlich von der Maschine in der Werkstatt separierten, neuartigen Arbeitsprozeß. Maschinentechnische Basis dieser Steuerungen waren aufwendige Portalfräsmaschinen, sogenannte "skin mills", die bis dahin in der Regel von Kopier- oder Nachformsystemen gesteuert wurden.

Beteiligt an der Entwicklung des Prototyps der NC-Maschine waren drei Gruppen von Akteuren, deren grundlegende Interessen und Zielsetzungen nur partiell kompatibel waren und die im Laufe der Entwicklung zunehmend auseinander fielen.¹ Der Anstoß für diese NC-Entwicklung ging von John T. Parsons aus, der als Betriebsleiter der Parsons Corporation in Traverse City/Michigan gegen Ende des Zweiten Weltkrieges vor dem Problem stand, den Fertigungsprozeß von Rotorblättern für Hubschrauber zu rationalisieren. Rotorblätter für Hubschrauber waren in der zweiten Hälfte der 40er Jahre das Hauptprodukt von Parsons Unternehmen. Parsons Ziel war es, die für den Fertigungsprozeß erforderlichen Schablonen nicht weiterhin wie bisher in aufwendiger manueller Weise, sondern auf der Basis einer numerischen Beschreibung des Werkstückes und einer solche Daten verarbeitenden Maschinensteuerung automatisch herzustellen.

Die Konstruktion und Fertigung von Rotorblättern war eine technisch anspruchsvolle und zeitaufwendige Aufgabe. Zur Bewältigung dieser Anforderungen stellte Parsons kurz nach 1945 einen erfahrenen Ingenieur, Frank Stulen, vom Forschungs- und Fertigungszentrum der Air Force in Wright Field/Ohio ein, der eine Konstruktionsabteilung aufbauen sollte. Eine der wichtigsten von Stulen durchgeführten Innovationen war, einen IBM-Rechner für die Berechnung der Festigkeiten und Profile der Rotor-

1 Vergleiche zum folgenden insbesondere die instruktive Darstellung bei Noble (1979; 1984) sowie das jüngst erschienene Buch von J.F. Reintjes, dem damaligen Direktor des Servo Lab des MIT, über die NC-Entwicklung (1991). Darüber hinaus basiert die folgende Darstellung auf ausführlichen Interviews mit John T. Parsons und Frank Stulen, den "Erfindern" der NC-Technik, im Mai 1991 in Traverse City/Michigan.

blätter zu nutzen, wodurch die Konstruktionszeiten ganz erheblich verkürzt werden konnten.

Bei der Fertigung dieser Teile war das zentrale Problem die Herstellung von Schablonen. Die herkömmliche Fertigungsmethode war die Berechnung von Punkten (17 Punkte für eine Kurve von zwei Fuß), die mit einem Kurvenlineal manuell zur Kurve verbunden wurden. Dann wurde das Stück ausgebohrt oder ausgesägt und in Handarbeit mit einer Feile fertiggestellt (Bild 6).

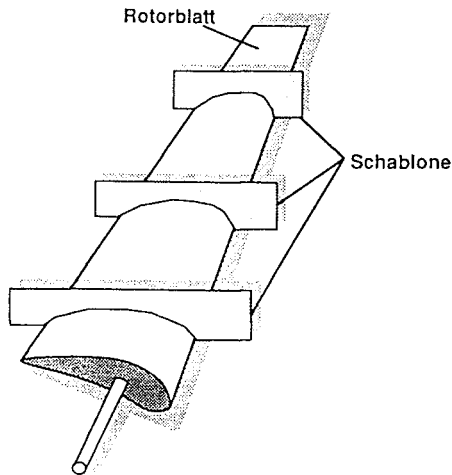


Bild 6: Schablonen zur Herstellung von Rotorblättern
(Quelle: Spur 1991)

Zur Rationalisierung dieses Fertigungsprozesses kalkulierte Stulen nun deutlich mehr Punkte entlang der Kurvenkontur, jetzt 200 anstatt 17, und jeder Punkt wurde mit Koordinaten festgehalten. Das Teil konnte nun direkt durch das Ausbohren der festgelegten Punkte ausgeschnitten und die verbleibenden Ränder mit einer Feile geglättet werden. Die weiterführende Überlegung von Parsons war nun, Stulens Konstruktionsrechner für die Berechnung der Koordinatenwerte der Punkte zu nutzen, Lochkarten mit diesen Koordinatenwerten auszudrucken und mit Hilfe der Lochkar-

ten eine Werkzeugmaschine zu steuern. Zunächst sollte dies eine Bohrmaschine sein, später wurde daraus das Konzept einer Dreiaachsensteuerung für eine Fräsmaschine. Resultat dieser Überlegungen war 1948 das Konzept einer lochkartengesteuerten Fräsmaschine, das Cardamatic-System, mit dem die Konturen der Schablonen für die Rotorblätter herausgearbeitet werden sollten.

Der zweite, an einer solchen Entwicklung hochinteressierte Akteur war die US-Air Force. Nach längeren Verhandlungen Ende 1948/Anfang 1949 mit Parsons begann sie ab Mitte 1949 auf der Basis eines direkten Vertrages mit ihm die Realisierung des Cardamatic-Konzeptes zu fördern. Das Interesse der Air Force richtete sich zunächst auf die möglichst präzise und qualitativ gleichbleibende Fertigung neuer düsengetriebener Militärflugzeuge.

An dieser Air Force-Förderung wurde zunächst auf Initiative von Parsons, als dritter Akteur, das Servo Lab des MIT an der Entwicklung beteiligt, da es über Erfahrungen mit Steuerungstechniken und dazugehörigen Antriebsmechanismen aus der Entwicklung von Maschinenwaffen verfügte, die für die Entwicklung der Maschinensteuerung genutzt werden sollten. Weitere Entwicklungspartner waren IBM, wo der Lochkartenleser des Cardamatic-Systems weiterentwickelt und für Fertigungserfordernisse nutzbar gemacht werden sollte, und schließlich sollte ein kleinerer Werkzeugmaschinenhersteller (Snyder Corporation) eine digital steuerbare Fräsmaschine entwickeln.

Der Bestand dieser Entwicklerkonstellation war nicht von Dauer. Anfang 1952 wurde der von Parsons initiierte Kontrakt gelöst, und nur einige Wochen später schloß das MIT einen neuen Vertrag mit der Air Force zur Entwicklung einer NC-gesteuerten Werkzeugmaschine ab. Anlaß waren Managementprobleme in Parsons Unternehmen und seine kurzzeitige Entlassung als Direktor. Tatsächlich waren jedoch die divergierenden Interessen und Ziele der an der Entwicklung beteiligten Partner für das vertragliche Neuarrangement verantwortlich. Parsons verfolgte, betriebspraktisch und anwendungsorientiert, die Realisierung eines begrenzt komplexen und automatisierten Systems, das ausgestattet mit der Möglichkeit einer manuellen Eingabe von Schnittgeschwindigkeiten und Schnitttiefen vornehmlich für die Fertigung von bestimmten Teilen, wie Flügelkonturen oder Rotorblätter, ausgelegt werden sollte. Parsons NC-Konzept richtete

sich unmittelbar auf die Bewältigung von Fertigungsproblemen: Es sollte eine numerische Steuerung zu Kosten entwickelt werden, für die es möglich gewesen wäre, sehr schnell weitere industrielle Anwender für die neue Technik zu finden (Noble 1984, S. 120). Die Entwicklungsgruppe am MIT hingegen verfolgte einen sehr viel ambitionierteren, informatikorientierten Ansatz, indem sie eine komplexe und vollautomatische Maschinensteuerung entwickeln wollte. Sie definierte die NC-Entwicklung primär als computertechnisches Problem, betonte die Notwendigkeit systematischer Forschungsarbeiten als Voraussetzung der Steuerungsentwicklung und versuchte, eigene Systeme und Computerentwicklungen für die Steuerung von Werkzeugmaschinen zu nutzen. Dabei griffen die Wissenschaftler aus dem MIT auf das von ihnen in den Jahren zuvor im Auftrag der US Navy entwickelte Whirlwind-Computersystem zurück. Die möglichst weitreichende Nutzung der damals verfügbaren Computertechnologie war allerdings unter den Prämissen des MIT-Ansatzes technisch notwendig, da eine Maschine mit einer Bahnsteuerung die Verarbeitung größerer Datenmengen erforderte, als dies bei dem Vorhaben Parsons der Fall war.

Mit ihrem Konzept fanden die Computerspezialisten und elektrotechnischen Ingenieure des MIT rasche und zunehmende Unterstützung bei der Air Force. Während das Militär anfangs nur an einer technisch praktikablen Lösung für die Bearbeitung bestimmter Flügelkonturen und Flugzeugteile interessiert war, entwickelte es im Verlauf des Projektes ein zunehmendes Interesse an der neuen Fertigungstechnik selbst. Das Konzept einer digitalisierten Maschinensteuerung versprach eine generell anwendbare Lösung für die komplexer werdenden Fertigungsprobleme von Hochleistungsflugzeugen.

Einige empirische Hinweise legen die Vermutung nahe, daß die Wissenschaftler des MIT ihre weitreichenden Entwicklungsziele im Gegensatz zu den Absichten von Parsons offenbar schon seit Beginn ihrer Beteiligung an der NC-Entwicklung verfolgten (Reintjes 1991, S. 25 ff.), so daß sie relativ schnell, schon im September 1952, die Steuerung der Hydro-Tel-Maschine präsentieren konnten. Ihr Grundkonzept sollte die NC-Entwicklung der darauffolgenden Jahre maßgeblich bestimmen. Es handelte sich um eine fertigungstechnische Basisinnovation, die auf einer umfassenden Nutzung des damals verfügbaren Kenntnisstandes der Informatik, Steuerungs- und Computertechnologie basierte. Angestrebt wurde damit die möglichst weitreichende Automatisierung eines allerdings nur schmalen

Ausschnitts der industriellen Metallbearbeitung, nämlich der Herstellung geometrisch komplizierter Flugzeugteile; es war eine Spezialtechnik mit hoher Komplexität.

b) Innovation und beginnende Diffusion

Freilich verlief zunächst die weitere Entwicklung der neuen Technik zögernder, als ihre Entwickler hofften. Das MIT und die Air Force glaubten, daß sowohl die Maschinenhersteller aus dem Werkzeugmaschinenbau als auch die Anwender aus der Flugzeugindustrie die neue Technik relativ schnell übernehmen würden. Diese zeigten zunächst aber nur wenig Interesse an der Weiterentwicklung und Anwendung der neuen Technik, da sie als zu unzuverlässig, zu komplex und zu teuer angesehen wurde. Für den Zeitraum bis Mitte der 50er Jahre sind daher nur wenige Versuche zur Weiterentwicklung der neuen Fertigungstechnik bekannt geworden: erstens die Entwicklung eines Bahnsteuerungssystems mit Magnetbändern als Datenträger von Wissenschaftlern, die an der MIT-Entwicklung beteiligt waren und das Institut verlassen hatten (Pirker u.a. 1970, S. 35); zweitens die Kooperation des MIT mit Bendix, einem Unternehmen aus der Elektrotechnischen Industrie, das später zum großen Steuerungshersteller wurde; drittens die Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenhersteller Kearney and Trecker zur Kommerzialisierung des MIT-Konzepts (Noble 1984, S. 134); und schließlich die Entwicklung einer Bahnsteuerung durch den großen Werkzeugmaschinenhersteller Giddings & Lewis, der trotz einiger technischer Unterschiede ebenfalls grundlegend der MIT-Konzeption folgte.

Bei dem System von Giddings & Lewis handelte es sich um eine Portalfräsmaschine mit einem Steuerungssystem "Numericord" für fünf Achsen und einer Dateneingabe über Magnetband. Technisch basiert diese Entwicklung interessanterweise auf einem zuvor vom Elektrotechnischen Unternehmen General Electric (GE) für Giddings & Lewis entwickelten Playback-System, eines in seiner Funktionsweise und Bedienbarkeit grundlegend vom MIT-Konzept abweichenden Steuerungssystems (s.u. Kap. IV, 2.), das jedoch durch die Adaption eines off-line-betriebenen Digitalcomputers der MIT-Entwicklung angepaßt wurde. Dieses System war Teil eines Air Force-Auftrages über die Herstellung einer großen Presse, für deren Produktion diese Fräsmaschine benötigt wurde. Aufgrund der Größenverhältnisse der herzustellenden Presse waren dafür die herkömmlichen Steuerungsmöglichkeiten wie Kopier- oder Nachformfräsen nur unter großen Schwierigkeiten einsetzbar (Reintjes 1991, S. 66 ff.).

Diese nur langsame Fortentwicklung und Verbreitung der neuen Technik wurde Mitte der 50er Jahre durch eine weitere massive militärische Förderung überwunden, und es begannen sich auf der Entwicklerseite zunehmend mehr Werkzeugmaschinenbauer, wie auch Hersteller aus der Elektrotechnischen Industrie, und auf der Anwenderseite immer mehr Betriebe der Luftfahrtindustrie für die NC-Technik zu interessieren (Noble 1984, S. 201 ff.). 1955 startete das Air Material Command (AMC) der Air Force sein Investitionsprogramm von Werkzeugmaschinen für Betriebe der Rüstungsindustrie, um die Anschaffung von NC-Maschinen zu fördern. Diese Maschinen sollten in Betrieben der militärischen Luftfahrtindustrie installiert werden, die entweder Haupt- oder Subkontrakteure der Air Force waren. In enger Abstimmung mit dem Industrieverband der Luftfahrtindustrie AIA (Aircraft Industries Associations) sollten 150 große Fräsmaschinen angeschafft werden, alle mit mehrachsigen Bahnsteuerungen ausgerüstet. Die Investitionssumme belief sich Schätzungen zufolge auf ca. 30 Mio. \$ (Reintjes 1991, S. 139). Folgt man der Einschätzung Nobles, schuf die Air Force mit dieser Investitionsmaßnahme mit einem Schlag einen "Markt" für die NC-Technik (1984, S. 201);² (Bild 7).

Da zu diesem Zeitpunkt nur einige und wenig erprobte Steuerungen verfügbar waren, wurde durch diese militärische Fördermaßnahme zunächst ein massiver Entwicklungsschub der neuen Technik angestoßen. Aufgrund der militärischen Spezifikation ging es dabei de facto ausschließlich um die Entwicklung oder um die Neuentwicklung von Steuerungssystemen, die im Prinzip der MIT-Konzeption folgten. Kosten spielten eine nachgeordnete Rolle; die Entwickler standen im Wettbewerb um Anforderungen an Leistung und Kompetenz für die militärisch finanzierten Anwender in der Luftfahrtindustrie. Überwiegend sahen sie zu diesem Zeitpunkt wenig Anlaß, billigere und weniger komplexe Steuerungen für den kommerziellen Markt zu entwickeln (Noble 1986, S. 105 f.). Schließlich erfüllten vier neu- und weiterentwickelte Steuerungssysteme die Anforderungen des Militärs. Sie waren zumeist in Kooperation einer Reihe großer Werkzeugmaschinenhersteller, typisch etwa Cincinnati Milling Machine Com-

2 Zum gleichen Zeitpunkt beschaffte die US-Air Force auch konventionelle Kopierfräsmaschinen. Voraussetzung für deren Anschaffung allerdings war, daß sie jederzeit auf NC-Steuerung umrüstbar sein mußten (Reintjes 1991, S. 156).

pany,³ mit Herstellern aus der Elektrotechnischen Industrie, wie etwa General Electric (GE) oder Bendix, entwickelt worden.

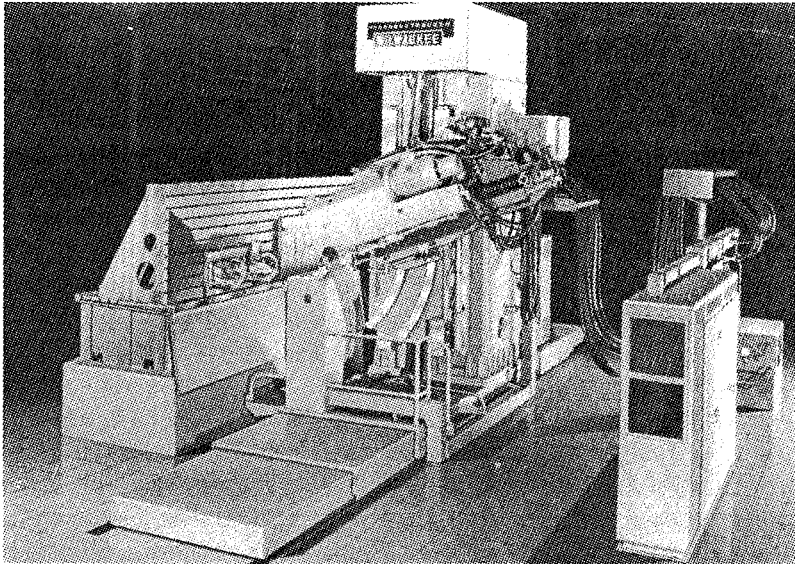


Bild 7: Von der Air Force beschaffte Kearney and Trecker Profilfräsmaschine mit Bendix Steuerung für die Northrop Flugzeugwerke; zweite Hälfte der 50er Jahre

(Quelle: Reintjes 1991)

Im einzelnen handelte es sich dabei um: Giddings & Lewis/General Electric/Concord Control; Kearney and Trecker/Bendix, Morey Maschine Corporation/Electronic Control Systems und Cincinnati/Electrical Musical Instruments Ltd./UK. Die Aufträge wurden in Relation zur Größe der Hersteller vergeben, so daß Cincinnati Milling Maschine Company, zum damaligen Zeitpunkt der größte Werkzeugmaschinenhersteller, die meisten Aufträge erhielt (Noble 1984, S. 202). Nach Auskunft eines interviewten Experten dieses Herstellers handelte es sich dabei um ca. 30 skin mills. Im Unterschied zu den übrigen US-Herstellern kooperierte Cincinnati mit dem britischen Steuerungshersteller Electrical Musical Instruments (EMI), dessen grundlegendes Steuerungskonzept, ebenfalls in der

3 Später Cincinnati Milacron Inc.

ersten Hälfte der 50er Jahre entwickelt, aus der Waffentechnik stammte und dem MIT-Konzept sehr ähnelte.⁴

Mit diesem Entwicklungsschub wurde in den USA in der zweiten Hälfte der 50er Jahre der NC-Entwicklungspfad hoher Komplexität und weitreichender Automatisierung, der nur in begrenzten Anwendungsfeldern zumindest technisch, möglicherweise auch ökonomisch sinnvoll einsetzbar war, endgültig etabliert. Bei den Systemen handelt es sich um Bahnsteuerungen, die drei bis fünf Maschinenachsen steuerten; die Bearbeitungsprogramme wurden mit großem Aufwand zunächst manuell werkstattextern erstellt. Grundsätzlich konnten an den komplexen Bahnsteuerungen mit den damals verfügbaren informations- und computertechnologischen Mitteln kaum direkte Dateneingabemöglichkeiten realisiert werden. Denn die über diese Steuerungen erzeugten Bearbeitungswege an den Werkzeugmaschinen konnten nur über eine große Anzahl von Weginformationen beschrieben werden, die damals allein über direkt unzugängliche Informationsträger wie Lochstreifen oder Magnetband in die Steuerung eingegeben werden konnten (Kap. III; Simon 1963, S. 32). Dieser Entwicklungspfad der NC-Technik erforderte daher für die werkstattexterne Maschinenprogrammierung sehr qualifizierte Arbeitskräfte, während sich die Arbeitsanforderungen an die Maschinenführer in der Werkstatt im Vergleich zur konventionellen Bearbeitung erheblich reduzierten (Harrington 1973, S. 73 f.). Die Steuerungssysteme erlaubten den Maschinenführern keinerlei Eingriff in den vorprogrammierten automatischen Bearbeitungsprozeß. Teilweise konnten die Operateure jedoch später, bei Systemen die Ende der 50er Jahre entwickelt wurden, Drehzahlen und Schnitttiefe variieren oder Hilfsfunktionen wie Kühlmiteileinsatz direkt an der Maschine ein- und ausschalten.

4 Die ersten NC-Steuerungen in Europa wurden in Großbritannien entwickelt. 1955 wurde erstmals eine lochstreifengesteuerte Werkzeugmaschine des Werkzeugmaschinenbauers Lawrence, Scott & Electromotors mit einer EMI-Steuerung vorgestellt. Britische Steuerungshersteller, wie das Rüstungsunternehmen Ferranti und der Elektrokonzern EMI, entwickelten über viele Jahre hinweg überaus komplexe Steuerungen, die - ähnlich wie in den USA - primär für den Einsatz in der Luftfahrtindustrie konzipiert wurden. Wie bei Cincinnati waren verschiedentlich diese Steuerungshersteller Lizenzgeber für Entwickler in den USA (Pirker u.a. 1970, S. 58 ff.; Spur 1991, S. 524 f.). Ob in den frühen Entwicklungsphasen Kontakte zu den amerikanischen Entwicklern am MIT bestanden, ist ungeklärt.

Ob es Eingriffsmöglichkeiten für die Maschinenführer im Maschinenablauf gab, hing im einzelnen davon ab, ob der Steuerungscomputer in die Steuerung der Maschine integriert (sogenannter On-line-Interpolator) oder räumlich getrennt (sogenannter Off-line-Interpolator) angeordnet war. Beide Systemkonzepte wurden in den 50er Jahren gleichermaßen verfolgt. Das On-line-Konzept eröffnete unter den Bedingungen der damals begrenzten direkten Speichermöglichkeiten im Prinzip einige wenige Eingriffsmöglichkeiten, wie etwa die Variation der Schnittgeschwindigkeit. Das Off-line-Konzept hingegen erlaubte keine Eingriffe in den automatischen Maschinenablauf. Schnittgeschwindigkeiten konnten allenfalls indirekt dadurch verändert werden, daß die Lesegeschwindigkeit des Lochstreifens oder des Magnetbands variiert wurde. Dieses Konzept zielte daher explizit auf die Eliminierung der meisten Bedienerfunktionen, um eine bessere Kontrolle der Produktionszeiten durch das Management zu erreichen (Simon 1962; Oleston 1970; Kief 1991).

Der Verlauf dieses Entwicklungspfades wurde nicht nur sehr nachhaltig von den Anforderungen der Luftfahrtindustrie und den damit verbundenen Interessen der Air Force geprägt, sondern es kamen darüber hinaus noch weitergehende militärische Interessen zum Tragen. Diese schlugen sich in den Normierungsanstrengungen für die Hard- und Software der Steuerungen in der zweiten Hälfte der 50er Jahre nieder, die sich generell auf Einheitlichkeit, Kompatibilität und leichte Austauschbarkeit zentraler Steuerungskomponenten richteten. Des weiteren ging es um die Vereinheitlichung von Eingabemedien, Programmietechniken und Programmiersprachen. Diese Bemühungen zielten auf die Sicherung einer möglichst störungsfreien Fertigung der Militärflugzeuge, die leichte Austauschbarkeit von Programmen und Daten zwischen teilweise weit auseinanderliegenden Herstellerwerken und schließlich auf die Möglichkeit, die Produktion der Waffen im Kriegsfall schnell "hochfahren" zu können (Noble 1984, S. 203 ff.).

Ein Resultat dieses Normierungsprozesses war unter anderem die Festschreibung des Lochstreifens mit bestimmten Spezifikationen als Datenträger. Weiterhin ging es um die Normierung der Programmiersprachen, denn der Programmieraufwand bildete einen erheblichen Engpaß bei der Nutzung der mehrachsigen Profilfräsmaschinen. Daher wurde auf Initiative der Air Force, aber mit einer Finanzierung durch die Luftfahrtindustrie, ab 1955 begonnen in einer Entwicklergruppe von neun Flugzeugherstellern, IBM und unter der Federführung des MIT das Programmiersystem APT (Automatically Programmed Tool) zu entwickeln. 1957 wurde die erste Version dieses Systems einer größeren Fachöffentlichkeit vorgestellt. 1959 wurde die Entwicklung einer zweiten Version (APT II) für die

Programmierung räumlich gekrümmter Bearbeitungswege, diesmal nur noch mit indirekter Beteiligung des MIT, im wesentlichen durch die Luftfahrtindustrie abgeschlossen und zugleich als Industrienorm etabliert. In der ersten Hälfte der 60er Jahre wurde schließlich eine die Programmierung erheblich vereinfachende dritte APT-Version, gleichfalls mit Förderung der Luftfahrtindustrie am IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute), entwickelt. Die Entwicklung von APT stellte, Reintjes zufolge, einen "major turning point in the evolution of NC" dar, da mit dieser Programmiersprache die Programmierkosten und -zeiten drastisch gesenkt werden konnten (Reintjes 1991, S. 78 ff.).

Freilich war APT im praktischen Betrieb trotz aller Bemühungen um Vereinfachung überaus kompliziert, schwerfällig und zeitaufwendig. Sein Einsatz war an Großrechner gebunden, und das System konnte in seiner Anfangszeit nur von mathematisch qualifizierten Programmierern genutzt werden (Noble 1984, S. 142 f.). Der Mathematiker D.T. Ross, unter dessen Federführung nicht nur das APT-System, sondern in den 60er Jahren auch die ersten CAD-Entwicklungen (CAD: Computer Aided Design) am MIT durchgeführt wurden, nannte die Anwendung daher "den schrecklichen Aufruhr der Praxisprobleme in der Entwicklung des APT-Systems" (Noble 1979, S. 14). Gleichwohl verbreitete sich das System in der amerikanischen Industrie allmählich, verdrängte über eine ganze Reihe von Jahren hinweg einfachere und praxisorientiertere Programmiersysteme und verstärkte die technisch bedingte Notwendigkeit einer vom Werkstattprozeß separierten, arbeitsteilig ausgelegten Programmierung der NC-Werkzeugmaschinen mit der Folge eines ständig sich verstärkenden Verlustes von Handlungs- und Entscheidungsspielräumen im Werkstattbereich.

Die Air Force finanzierte diese erste Phase der NC-Entwicklung zwischen 1949 und 1959 mit rd. 62 Mio. \$ (DiFilippo 1986, S. 56 ff.); das MIT war mehr als acht Jahre - von Anfang 1951 bis Ende 1959 - unmittelbar an dieser Entwicklung beteiligt, erhielt von dieser Gesamtsumme allerdings nur wenig mehr als eine Mio. \$ (Reintjes 1991, S. 91).

c) Allmähliche Anpassung an zivile Anwendungsbedingungen

Seit dem Ende der 50er Jahre gewann die NC-Entwicklung in den USA an Breite und Differenziertheit. Verschiedentlich wird diese Entwicklungsphase als "down market" bezeichnet, in dessen Verlauf die bisherigen komplexen und teuren, militärisch orientierten Systeme durch ihre Weiterentwicklung und Vereinfachung einer marktorientierten, zivilen Nutzung und breiteren Diffusion zugänglich gemacht werden sollten (IEN 1983). Die NC-Entwicklung in den USA begann sich in Richtung des oben mit begrenzter Automatisierung gekennzeichneten Entwicklungspfad (Kap. III, 3.) zu öffnen, wobei allerdings die aufwendigen und teuren Systeme zur Automatisierung komplizierter Bearbeitungsprozesse nach wie vor für die Entwicklung quantitativ und qualitativ prägend blieben.

Bestimmender Faktor für die Ausweitung des Entwicklungspfad war zunächst ein wachsendes Interesse vieler der bisherigen Hersteller, die Absatzmöglichkeiten der neuen Technik auszuweiten, da sich eine Sättigung des NC-Einsatzes in der Luftfahrtindustrie abzuzeichnen begann (Noble 1984, S. 214). Darüber hinaus griffen seit dem Ende der 50er Jahre vermehrt neue und kommerziell orientierte Hersteller aus dem Werkzeugmaschinenbau die Technik auf und versuchten, sie für ihre angestammten Absatzfelder in der nicht-militärischen Metallindustrie anzupassen. Bis Ende 1962 waren offensichtlich fast alle wichtigen Werkzeugmaschinenhersteller mit der Entwicklung von NC-Steuerungen befaßt (Howe 1969). Indiz für diese veränderte Entwicklungssituation ist nicht zuletzt, daß die Produktionszahlen von NC-Maschinen Anfang der 60er Jahre deutlich zu steigen begannen (Tab. 1).

Technologische Voraussetzung dieses Entwicklungsschritts waren ab Ende der 50er Jahre die Transistortechnik auf Halbleiterbasis und ab Mitte der 60er Jahre integrierte Schaltkreise, die die bis dahin vorherrschende Röhren- und Relais-technologie ablöste. Obgleich nach wie vor technisch anfällig, konnte damit die Zuverlässigkeit der Systeme erheblich gesteigert werden. Erreicht wurde dies unter anderem dadurch, daß die Bauteile der Steuerungen jetzt weit weniger Wärme erzeugten als früher, weshalb sie nicht mehr ständig, auf häufig kompliziertem Wege gekühlt werden mußten (Childs 1965). Auch wurden die Steuerungen vermehrt nach dem Baukastenprinzip aufgebaut, wodurch ihre Reparaturfreundlichkeit gesteigert werden konnte (Pirker u.a. 1970, S. 39 ff.).

Ein wichtiges Merkmal des "down-market"-Prozesses war die Vereinfachung und Verbilligung der bis dahin entwickelten komplizierten Systeme. Sie wurden für einfachere Anwendungsfelder modifiziert, insbesondere wurde die Kapazität der Steuerungen im Hinblick auf die Zahl der anzusteuernden Maschinenachsen reduziert. Überdies wurden die Steuerungen so ausgelegt, daß sie nun beschränkte Eingriffsmöglichkeiten für das Werkstattpersonal in den Ablauf des vorgegebenen Programms gestatteten (Boese u.a. 1964, S. 40). Dabei handelte es sich um Variationsmöglichkeiten für Vorschübe und Drehzahlen, Korrekturmöglichkeiten für Werkzeugwerte sowie um die manuelle Positionierung der Maschinenachsen - Möglichkeiten, die gemessen an späteren Systemen etwas überzogen in den Darstellungen der Hersteller teilweise als MDI (Manual Data Input) bezeichnet wurden (z.B. Allen Bradley Firmenunterlage). Eingabeelemente dafür waren beispielsweise Dekadenschalter oder Tastaturen, mit denen auf mechanischem Wege ein begrenztes Datenvolumen direkt in der Steuerung gespeichert werden konnte. Verschiedentlich wurden die Steuerungen auch, wie etwa bei einigen Steuerungen von Cincinnati, mit Magnetspeichern versehen. Damit eröffneten sich Eingriffsmöglichkeiten der Maschinenführer in den automatischen Programmablauf. Absicht war, Störungen und Unterbrechungen, die früher zum Stillstand der Maschinen oder zum Ausschuß von Werkzeugstücken geführt hätten, durch direkte Korrekturen möglichst gering zu halten und auch die Möglichkeiten für einen Programmtest durch ein schrittweises Abfahren der Programme wie aber auch die Instandhaltung der Maschine zu verbessern.

Als typisch für diese Entwicklungsphase kann eine Zweiachsensteuerung von Bendix mit direkten Eingriffs- und Dateneingabemöglichkeiten über Dekadenschalter angesehen werden. Dieses System Dynapath wurde Mitte der 60er Jahre für den kommerziellen Markt entwickelt und wurde offensichtlich ein relativ großer Erfolg. Ähnlich das Steuerungssystem Mark Century von General Electric, bei dem in späteren Versionen in der zweiten Hälfte der 60er Jahre die Anzeige einzelner NC-Sätze und die Möglichkeit für die Eingabe eines einzelnen NC-Satzes direkt an der Steuerung zumindest als Option angeboten wurden.

Ein weiteres wichtiges Merkmal dieser Entwicklungsphase war das Aufkommen einfacher und relativ billiger Punkt- und Streckensteuerungen im Unterschied zu den bisher dominierenden Bahnsteuerungen, mit denen das Einsatzfeld der NC-Technik grundlegend in Richtung weniger komplexer, kommerzieller Produktionsprozesse erweitert wurde. Den vorliegenden Informationen zufolge war das Haupteinsatzfeld von Werkzeug-

maschinen mit diesen Steuerungen die Zulieferindustrie der Automobil-, Landmaschinen- und Elektrotechnischen Industrie (AM 1963, S. 71 ff.).

Mit solchen einfachen Punkt- oder Streckensteuerungen wurde vereinzelt schon in der zweiten Hälfte der 50er Jahre experimentiert; so wurde erstmals 1955 auf der Werkzeugmaschinenmesse in Chicago eine Metallpresse ausgestellt, die mit einer Punktsteuerung von General Electric ausgerüstet war (IEN 1983, S. 71). In den Jahren darauf wurden vereinzelt weitere mit Punktsteuerungen ausgerüstete Werkzeugmaschinen auf den Markt gebracht, denen jedoch nur ein relativ geringer Erfolg beschieden war (March et al. 1989, S. 23 f.). Auf breiter Front wurden solche Steuerungen dann ab Beginn der 60er Jahre entwickelt.

Bei diesen Steuerungen handelte es sich zumeist nur um Zweiachsensteuerungen. Obgleich sie extern programmiert werden mußten und die Programme über Bänder oder Lochstreifen eingegeben wurden, eröffneten sie stärker als die komplexeren Steuerungssysteme gewisse Möglichkeiten einer ergänzenden und modifizierenden Dateneingabe durch die Maschinenführer. Dem vorliegenden Material zufolge boten alle nennenswerten Steuerungshersteller und Werkzeugmaschinenbauer solche Steuerungen an. Typische Beispiele sind sogenannte Low-Cost-Steuerungen der Baureihe Cintamatic, später Acramatic von Cincinnati Milacron, die Baureihe Mark Century 120 von General Electric oder das System Tape-O-Matic von Pratt & Whitney, das verschiedentlich als Einstieg in die breitere Entwicklung relativ billiger und einfacher Steuerungssysteme angesehen wurde (Schulz 1964).

Die Möglichkeiten der direkten Dateneingabe umfaßten die Modifikation von Werkzeugdaten, Werkstückpositionen (Nullpunkt-Bestimmung) sowie Schnitttiefe und Vorschub. Ähnlich wie die komplexen Steuerungen waren diese mit einer "operators console" ausgestattet, wo Daten über Druckknöpfe oder mechanische Schalter, die sowohl Speicher- als auch Eingabefunktionen hatten, eingegeben werden konnten. Eine Unterstützung und Verbesserung der direkten Eingabemöglichkeiten war, daß etwa ab Mitte der 60er Jahre die Steuerungen teilweise mit numerischen Anzeigen der Werkzeugpositionen oder auch der jeweiligen in Arbeit befindlichen NC-Sätze ausgerüstet werden konnten. Es handelte sich bei den direkten Bedienmöglichkeiten vielfach nur um eine Ausstattungsoption der Steuerungen, die von den Herstellern zusätzlich angeboten wurde (Oleston 1970).

Der Prozeß des "down market" umfaßte außerdem die Entwicklung einer ganzen Reihe von Programmiersprachen, die sich zwar an der grundlegenden APT-Entwicklung, die ja endgültig erst Mitte der 60er Jahre abgeschlossen war, orientierte, jedoch die APT-Logik vereinfachte und den Anwendungsaufwand verringerte. Zwischen 1961 und 1965 wurden in den USA mehr als 40 APT-ähnliche Programmiersprachen entwickelt, die auf die Vereinfachung und Verbilligung der bis dahin aufwendigen Programmierung zielten (IEN 1983, S. 72 f.; Harrington 1973, S. 62). Entwicklungsschritte in Richtung einer Überwindung der komplizierten APT-Logik hingegen durch einfacher aufgebaute und weniger geometrieorientierte Programmiersprachen wurden in den USA, ca. fünf Jahre nach vergleichbaren Entwicklungsansätzen in der Bundesrepublik (Kap. V), erst ab Ende der 60er Jahre unternommen, so daß sich allmählich in den 70er Jahren auf der Basis von Mini- oder Microcomputern neue Programmiersprachen durchzusetzen begannen (Noble 1984, S. 226).

Weiteres Moment dieser Diffusionsphase und der Erweiterung des bisherigen Entwicklungspfades ist die verstärkte Nutzung von NC-Steuerungen für die Drehbearbeitung, die die bis dahin starke Konzentrierung auf die in der Luft- und Raumfahrtindustrie vorherrschende Fräs- und Bohrbearbeitung beendete. Vorreiter war das Elektrotechnische Unternehmen General Electric, wo relativ frühzeitig, zunächst für die eigene Fertigung von Turbinenläufern, Drehmaschinensteuerungen entwickelt wurden. Etwa ab 1965 verkaufte dieser Hersteller solche Steuerungen - es handelte sich um vereinfachte und verbilligte Bahnsteuerungen, die mit einer ganzen Reihe von Handeingabemöglichkeiten ausgestattet waren - mit zunehmenden Erfolg auf dem amerikanischen wie auch auf dem westeuropäischen Markt (vgl. Kap. V, 1.).

Schließlich ist die Entwicklung von Bearbeitungszentren, die Ende der 50er Jahre einsetzte, ein Merkmal des Kommerzialisierungsprozesses der NC-Technik und einer gewissen Abkehr vom Entwicklungspfad weitreichender Automatisierung. Maschinentechnische Voraussetzung von Bearbeitungszentren war die Erfindung eines automatischen Werkzeugwechselsystems. Steuerungstechnisch war dieser Entwicklungsschritt an die NC-Technik gebunden, da allein mit ihrer Hilfe eine effektive Regulation der zusätzlichen Bearbeitungsdaten, wie die Positionen und Bewegungen der zahlreichen Werkzeuge, möglich wurde. Obgleich Bearbeitungszentren anfangs teuer und komplex waren, zielten sie mit ihrer breiten Ein-

setzbarkeit und den möglichen Rationalisierungseffekten auf das weite Feld der kommerziellen Metallbearbeitung.

Das erste Bearbeitungszentrum wurde 1958 vom Werkzeugmaschinenhersteller Kearney and Trecker vorgestellt. Dieses Maschinensystem "Milwaukee-Matic II" konnte Fräsen, Bohren, Räumen und Gewindebohren, verfügte über einen Speicher von 30 Werkzeugen und wurde von einer modifizierten GE-Bahnsteuerung gesteuert (IEN 1983, S. 72).

Die Entwicklungsphase der 60er Jahre war von einem wachsenden Anteil einfacherer NC-Steuerungen an der Gesamtzahl der in den USA produzierten NC-Systeme geprägt. Rein zahlenmäßig, bezogen auf die Anzahl der produzierten Einheiten, zeigte sich sehr schnell ein Übergewicht einfacherer Steuerungen gegenüber den komplexen Bahnsteuerungen: Expertenangaben zufolge wurden beispielsweise von Cincinnati Milacron von 1955 bis 1959 insgesamt 350 NC-Steuerungen, ausnahmslos Bahnsteuerungen, hergestellt, während im Zeitraum von 1960 bis 1969 von insgesamt 3.100 produzierten Steuerungen 2.600 Punktsteuerungen waren. Faßt man alle NC-Hersteller zusammen, so belief sich der Anteil der einfachen Steuerungen im Durchschnitt auf über 70 % (Tab. 3).

Gleichwohl blieb die Steuerungsentwicklung rückgebunden an, von Experten hin und wieder als "High-End-Systeme" bezeichnete Steuerungen hoher Komplexität und weitreichender Automatisierung, von denen die einfacheren Steuerungstypen in der Regel abgeleitet wurden (Simon 1964; RKW 1964). Das Gewicht solcher Systeme zeigt sich einmal darin, daß sich ihr wertmäßiger Anteil trotz vergleichsweise geringer Stückzahlen nach Expertenschätzungen auf bis zu 40 % des Wertes aller produzierten NC-Steuerungen beläuft (Childs 1965). Zum zweiten konzentrierten die wichtigsten und größten Steuerungshersteller ihre Hauptanstrengungen auf die Weiterentwicklung der komplexen Systeme. Dies galt sowohl für viele der Werkzeugmaschinenhersteller als auch für die dominanten Steuerungshersteller wie General Electric oder Allen Bradley. Experten meinten, daß für die Entwicklung dieser Steuerungssysteme ein überaus großer Overhead an Entwicklungskapazitäten und Know-how aus den 50er Jahren vorhanden war, der keiner wirklichen Kostenkontrolle unterlag und daher die Entwicklung in seinem Interesse beeinflusste. Die einfachen Steuerungskonzepte waren lediglich Nebenprodukte, deren Fortentwicklung häufig von einer wieder wachsenden Komplexität begleitet war.

USA			
	1954-65	1966	insges. bis 1968
Point-to-point	75 %	72 %	71 %
Continuous path by tape or punched card	12 %	18 %	19 %
Dial or plugboard	13 %	10 %	10 %
Basis (Zahl der NC-Maschinen)	7.018	2.845	15.704
BRD			
	1957-65	1966	insges. bis 1969
Punkt- oder Streckensteuerung	95 %	81 %	70 %
Bahnsteuerung	5 %	19 %	30 %
Basis (Zahl der NC-Maschinen)	196	160	1.137
* Die Zahlen geben nur einen groben Hinweis auf Entwicklungsdifferenzen. Die Angaben sind nicht unmittelbar vergleichbar, da die US-Daten auf Streckensteuerungen keinen Bezug nehmen und die Kategorie "Dial or plugboard" alle Steuerungsarten umfassen kann.			
Quellen: United States Department of Commerce 1969; Schultz-Wild, Weltz 1973; eigene Berechnungen			
Tabelle 3	Anteil verschiedener Steuerungsarten an der Jahresproduktion von NC-Maschinen in den USA und in der BRD in den 50er und 60er Jahren*		

Ein typisches Beispiel sind die Entwicklungsstrategien von General Electric, mit einem Marktanteil von teilweise mehr als 50 % in den 60er Jahren in den USA, in manchen Jahren der größte Hersteller von Steuerungen in der Welt. Zwar entwickelte General Electric mit der Baureihe Mark Century Bahnsteuerungen für kommerziell nutzbare und begrenzt komplexe Anwendungsfälle, wie etwa die Steuerung von Drehmaschinen, doch richteten sich die Erweiterungen dieser Baureihe an den Steuerungsanforderungen großer Fräsmaschinen für die Luft- und Raumfahrtindustrie aus. Weit deutlicher noch zeigen sich diese Zusammenhänge bei Allen Bradley, wo zunächst ausschließlich Punktsteuerungen entwickelt wurden. Diese wurden im Verlauf der 60er Jahre schrittweise komplexer. Ende der 60er Jahre lief diese Entwicklung mit den Steuerungen des militärisch orientierten Herstellers Bunker Ramo zusammen, der schließlich 1970 von Allen Bradley aufgekauft wurde.

Die Steuerungssysteme weitreichender Automatisierung fanden weiterhin in der Luftfahrt-, zunehmend auch in der Raumfahrtindustrie Verwendung (Noble 1984, S. 214). Wie vorliegende Zahlen über die Einsatzbereiche von NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen zeigen (Tab. 4), fanden bis Ende der 60er Jahre mindestens 30 % aller in den USA produzierten NC-Maschinen in der Luft- und Raumfahrtindustrie Verwendung. Daneben wurden Maschinen mit solchen Steuerungen in den 60er Jahren in kleineren Stückzahlen auch an die Autoindustrie, dort insbesondere für den Werkzeugbau geliefert. Das Interesse dieser Großanwender an umfangreichen direkten Eingriffs- und Bedienmöglichkeiten der Steuerungen war äußerst gering, und daher war allenfalls die Veränderung von Schnittwerten und ähnlichen Parametern während des automatischen Prozesses der Bearbeitung möglich. "In vielen Fällen", so die Befunde damaliger Betriebsbesuche, "ist man bestrebt, die Eingriffsmöglichkeiten des Mannes an der Maschine auf ein Minimum zu beschränken" (Waller 1964, S. 19). Auch in den 60er Jahren trat darüber hinaus das DOD (Department of Defense) als direkter Käufer von NC-Maschinen auf, um sie in den eigenen Fertigungsbetrieben zur Instandhaltung von Waffensystemen einzusetzen. Neben der US-Air Force kaufte auch das Army Material Command in den 60er Jahren jährlich bis zu 40 NC-Maschinen (Williams 1971).

Als typisch für diese Entwicklungsphase gelten bei interviewten Experten die Systeme des schon erwähnten Steuerungsherstellers Bunker Ramo für drei bis fünf Maschinenachsen. Sie wurden für Bearbeitungsprozesse entworfen, die konventionell nur noch schwer zu handhaben waren, und sie waren für einen vollautomatischen Betrieb ausgelegt. Mit einem Preis von bis zu 120.000 \$ waren sie extrem teuer und machten etwa 10 % des Wertes einer komplexen skin mill aus. Der Steuerungshersteller Bunker Ramo entstand 1962 aus der Fusion von zwei Steuerungsherstellern (Martin Marietta und TRW), die bis dahin teilweise wohl

nur für den eigenen Gebrauch, NC-Steuerungen für die Fertigung sphärisch gekrümmter Raketenteile entwickelt hatten.

USA		BRD	
	1954 - 68		1957 - 67
Machinery (total except electrical)	38,7	Maschinenbau (insgesamt)	63,2
Metal working machinery	11,9	Werkzeugma- schinenbau	30,0
Electrical machinery	12,7	Elektrotechnik	8,7
Motor vehicles and equipment	2,7	Fahrzeugbau	8,0
Aircraft and parts	14,9	Flugzeugbau/ Raumfahrt	1,7
Federal Government	11,1		
<p>* Die Zahlen dieser Tabelle berücksichtigen den Einfluß der Luft- und Raumfahrt-industrie nur unzureichend. Einmal erfaßt die US-Kategorie "Aircraft and parts" diesen Industriesektor nur partiell; hinzuzurechnen sind auf jeden Fall noch die Maschinenkäufe durch die Bundesregierung, hinter denen sich das Department of Defense verbirgt. Zum anderen werden ganz generell die direkten und indirekten Zulieferer dieses Sektors in der Regel anderen Branchen zugerechnet (vgl. Gebhardt, Hatzold 1978, S. 52).</p>			
<p>Quellen: United States Department of Commerce 1969; AK 1980; eigene Berechnungen</p>			
Tabelle 4	Wichtige Absatzbranchen für NC-Maschinen in den 50er und 60er Jahren; Anteil an der Gesamtzahl produzierter und im Inland abgesetzter NC-Maschinen in %*		

Auf eine Steigerung der Zuverlässigkeit dieser Systeme zielten darüber hinaus Entwicklungsschritte in Richtung ihrer weiteren Automatisierung. Wesentlich sind die frühen Versuche mit sogenannten Adaptive-Control-Systemen, die in Form eines automatischen Regelkreises Real-time-Anpassung des Bearbeitungsprozesses an sich verändernde Prozeßparameter

ermöglichen sollte. Erste Versuche mit solchen Systemen wurden ab 1962 vom Materials Laboratory der US-Air Force durchgeführt (Boese u.a. 1964, S. 35; Howe 1969, S. 22 f.). Darüber hinaus wurde durch die Entwicklung von Programmsimulatoren versucht, die Qualität der vorab erstellten Programme zu verbessern und nachträgliche Modifikationen in der Werkstatt zu vermeiden (Politsch 1964, S. 31). Wichtig in diesem Zusammenhang sind schließlich die ersten Versuche mit DNC-Systemen (Direct Numerical Control), die Mitte der 60er Jahre unter anderem von Bunker Ramo begonnen wurden (IEN 1983, S. 74). Mit dem Einsatz eines Zentralcomputers, der mehrere NC-Maschinen on line über eine größere Entfernung mit Daten versorgt, sollten technische Probleme, wie die nach wie vor begrenzte Werkstatttauglichkeit der elektronischen Bauelemente der Steuerungen, aber auch Personal- und Organisationsprobleme, wie die mangelnde Ausbildung der Maschinenführer, ausgeglichen werden (Rosenberg 1971). Mit diesen Systemen rückte erstmals die Perspektive einer vollautomatischen und rechnerintegrierten Fabrik - "the dream of NC-Pioneers" (IEN 1983, S. 74) - in greifbare Nähe; die Werkzeugmaschinenmesse von Chicago im Jahre 1970, auf der mehrere große DNC-Systeme unter anderem von GE und IBM ausgestellt wurden, schien den Realitätsgehalt und die industrielle Bedeutung dieser Entwicklungsperspektive zu bestätigen (WB 1/1971, S. 33 ff.).

d) Konservative Weiterentwicklung

Der Ende der 60er Jahre erreichte Entwicklungsstand der NC-Technik wurde in den 70er und später auch in den 80er Jahren kontinuierlich und schrittweise perfektioniert. Obgleich hochintegrierte Halbleiterspeicher und Mikroprozessoren zunehmend verfügbar waren und im Verlauf der 70er Jahre schnelle Entwicklungsschritte zu erwarten gewesen wären, blieben diese weitgehend aus. Vorangetrieben wurde die NC-Entwicklung jetzt von einer im Vergleich zu den 60er Jahren deutlich reduzierten Zahl von Entwicklern. Während sich noch in den 60er Jahren unter anderem eine größere Zahl von Werkzeugmaschinenbaubetrieben an der NC-Entwicklung beteiligten, wurde diese seit Ende der 60er Jahre immer stärker von Elektrotechnischen Unternehmen und nur einigen wenigen großen Werkzeugmaschinenherstellern geprägt; ähnlich wie schon in den 60er Jahren spielten wissenschaftliche Institute, wie das MIT, bei der NC-Ent-

wicklung nur mehr eine nachgeordnete Rolle.⁵ Der Verzicht vieler Werkzeugmaschinenbetriebe auf eine eigene NC-Entwicklung erklärt sich besonders aus ihren mangelnden Ressourcen und dem fehlenden Know-how, so daß sie den spezifischen Erfordernissen der Verwendung fortgeschrittener mikroelektronischer Computertechniken immer weniger gewachsen waren (Ong 1983, S. 8 ff.; Noble 1984, S. 180).

Als konservativ läßt sich die NC-Entwicklung in den USA seit Beginn der 70er Jahre in doppelter Hinsicht charakterisieren: zum einen im Hinblick auf die sehr langsame und nur zögerliche Nutzung der technologischen Potentiale der Mikroelektronik für die Weiterentwicklung dieser Technik, für ihre breitere und flexiblere Anwendbarkeit und für ihre verbesserte Werkstattprogrammierbarkeit, zum anderen im Hinblick auf das sich weiterhin erhaltende hohe Gewicht und die Bedeutung komplexer Automatisierungslösungen.

Erste Schritte der Verwendung mikroelektronischer Komponenten von CNC-Steuerungen begannen schon Ende der 60er Jahre, als eine ganze Reihe von Herstellern aus der Elektrotechnischen Industrie mit der neuen Technik experimentierte, Prototypen und Messe-Exponate baute. So wurde, Expertenangaben zufolge, weltweit die erste CNC-Steuerung 1970 auf der Werkzeugmaschinenmesse in Chicago von der Computerfirma Sperry ausgestellt. Dabei handelte es sich um eine fünfschichtige Positionier- und Streckensteuerung für die Bohr- und Fräsbearbeitung, deren Besonderheit ein eingebauter Digitalcomputer und eine Magnet-Speichertrommel waren (Dyke 1970). Ähnliche Systeme wurden kurze Zeit später von weiteren Herstellern, wie Bendix oder Allen Bradley, entwickelt.

Viele dieser Steuerungssysteme basierten allerdings zunächst erst einmal nicht auf Mikroprozessoren, sondern integrierten in die Steuerung die damals schon relativ leicht verfügbaren Kleinrechner zur Prozeßsteuerung, wie z.B. die bis heute bekannten DEC-Rechner der Baureihe PDP (Duelen 1973, S. 12).

-
- 5 Wissenschaftliche Institute wie das MIT widmeten sich dagegen verstärkt der Entwicklung rechnergestützter und später rechnerintegrierter Organisations- und Planungstechniken, wie CAD oder später CAD/CAM-Systemen, die in der Regel gleichfalls von der US-Air Force gefördert wurden. Insbesondere die am MIT vorangetriebene CAD-Entwicklung hatte ihre Wurzeln in der Entwicklung der Programmiersprache APT (Reintjes 1991, S. 93 ff.; Kap. VI, 2.)

Die breitere Nutzung der Mikroelektronik über Prototypen und Messe-Exponate hinaus und die Entwicklung von CNC-Steuerungen für einen industriellen Einsatz verliefen demgegenüber sehr viel zögernder, und viele US-Hersteller blieben lange Jahre mit ihren Steuerungskonzepten hinter den sich eröffnenden Möglichkeiten der CNC-Technik zurück. Offenbar bedeutete auch der Nachfrageeinbruch, der Anfang der 70er Jahre immerhin zu einem Produktionsrückgang bei NC-Maschinen in den USA, ähnlich wie in der Bundesrepublik, von einem Drittel führte (Tab. 1) für die Hersteller kein Anlaß, über Innovationen und Neuentwicklungen sich neue Absatzfelder zu erschließen.

Maßgebliche Hersteller von NC-Steuerungen, wie General Electric oder Allan Bradley, beschränkten sich zunächst darauf, ihre existierenden Baureihen mit fest verdrahteten NC-Steuerungen kontinuierlich weiterzuentwickeln. Dies betraf auch die direkten Möglichkeiten der Datenhandeingabe, die aufgrund verbesserter Speichermöglichkeiten erweitert wurden; häufig wurden derartige Möglichkeiten, von denen betont wurde, sie würden die Flexibilität des NC-Einsatzes deutlich erhöhen, lediglich aber als Option auf gesonderten Steuerungskomponenten angeboten (Allen Bradley Firmenunterlage). Typisch für diese Entwicklerpolitik ist besonders General Electric, wo aufgrund einer seit den 60er Jahren durchgängig stabilen und starken Marktposition keine Notwendigkeit gesehen wurde, CNC-Steuerungen in größerem Umfang anzubieten. Statt dessen setzte dieser Großhersteller bis Ende der 70er Jahre mit seiner Baureihe Mark Century 550 auf die festverdrahtete NC-Technik und begann erst nach erheblichen Verlusten von Marktanteilen eine CNC-Baureihe zur Marktreife zu entwickeln (Bild 8).

Die somit erst gegen Ende der 70er Jahre auf breiterer Front einsetzende CNC-Entwicklung verließ dabei nicht den bisherigen Hauptpfad der amerikanischen NC-Technik. So wurden schon die ersten CNC-Steuerungen vornehmlich für die Bearbeitung komplexer Teile in der Raketen- und Flugzeugindustrie ausgelegt, die in den 70er Jahren noch bis zu einem Fünftel des Marktes für NC-Maschinen in den USA ausmachte (Ong 1983, S. 29). Die später entwickelten CNC-Steuerungen, beispielsweise von General Electric oder Allen Bradley, waren zunächst gleichfalls komplex, galten als "ultimate controls" mit aufwendiger Ausstattung und komplexer Software, die einen hohen Engineering-Aufwand bei ihrer Adaption an Werkzeugmaschinen erforderten (March et al. 1989, S. 25 f.).

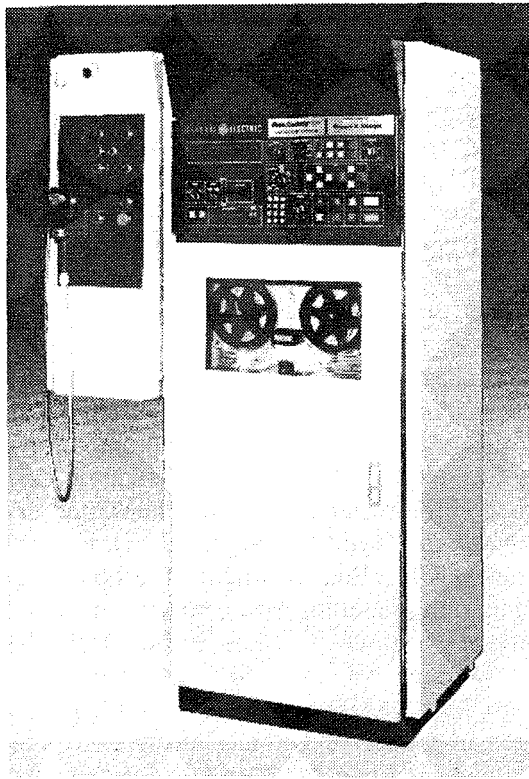


Bild 8: NC-Steuerung Mark Century 550 von General Electric 1974⁶
(Werkfoto Brown & Sharpe)

Typisches Beispiel ist die CNC-Steuerung Mark Century 1050 von General Electric, die, 1977/78 entwickelt, überaus komplex und aufwendig war und wenig verkauft wurde. Auch die 1982 vom gleichen Hersteller auf den Markt gebrachte Baureihe 2000 wies Experten zufolge ein hohes Leistungsniveau am "oberen Ende der NC-Anspruchsskala" auf, was sich, so ein befragter Maschinenbauingenieur in den USA, "niemand leisten konnte".

In Hinblick auf ihre Werkstattprogrammierbarkeit orientierte sich die Auslegung dieser Steuerungsbaureihe, um den organisatorischen Aufwand ihres Einsatzes zu

-
- 6 Die abgebildete Steuerung ist mit einem Keyboard unter anderem zum Einschalten einzelner Funktionen, zur Eingabe von Positionen und zur Variation von Drehzahlen ausgestattet.

verringern, an europäischen Vorbildern. Ein interviewter Experte, der lange Jahre mit der Entwicklung und dem Verkauf der Steuerungen von General Electric befaßt war, hob in diesem Zusammenhang besonders die an dieser Baureihe gegebenen Möglichkeiten einer interaktiven Programmierung und Bedienerführung hervor, gegen deren Einführung sich der Hersteller allerdings lange Zeit gewehrt habe.

Die direkten Eingabemöglichkeiten von Daten an diesen komplexen CNC-Steuerungen waren beschränkt und blieben hinter den prinzipiellen Möglichkeiten der neuen CNC-Technik zurück. Interviewte Experten meinten, daß die neuen Steuerungen im Grunde nicht viel weiter entwickelte Eingabemöglichkeiten als ihre fest verdrahteten Vorläufermodelle aufwiesen. Ein Hauptgrund lag in der weiterhin dominanten Automatisierungsperspektive der Entwickler; zumindest teilweise verfolgte man wohl auch mit dieser neuen Technik wie früher das Ziel, daß dadurch qualifizierte Maschinenführer überflüssig würden und man die CNC-gesteuerten Werkzeugmaschinen, etwa im Fall von Streiks, auch von Angestellten überwachen lassen könne (Spizig 1975). Das in den USA vermutlich bei vielen großbetrieblichen Anwendern der NC-Technik in dieser Phase nach wie vor geringe Interesse, die technischen Optionen der CNC-Steuerungen für ein "Operating" an den Maschinen zu nutzen, belegt beispielsweise auch die Erfahrung eines befragten Experten - ein früherer Maschinenarbeiter -, wonach an den ersten CNC-Steuerungen von General Electric die Tastaturen für eine Datenhandeingabe mit Abdeckplatten verschlossen gewesen seien.⁷

Ähnlich wie bei der NC-Entwicklung der 60er Jahre setzten sich dagegen einfachere und leichter zu bedienende CNC-Steuerungen mit einer begrenzten Zahl angesteuerter Achsen und geringerer Leistungsfähigkeit erst schrittweise und allmählich durch. Ihr vermehrtes Angebot läßt sich

7 Nach den Angaben des gleichen Experten sollen solche mit Abdeckplatten versehenen Steuerungen auch an deutsche Werkzeugmaschinenhersteller geliefert worden sein, die sie zu diesem Zeitpunkt für Drehmaschinen verwendeten. Im Unterschied zu amerikanischen Werkzeugmaschinenherstellern hatten die deutschen Hersteller aufgrund ihrer spezifischen Herstellerstrategien und den in Westdeutschland vorherrschenden Anwendungsbedingungen jedoch ein Interesse daran, die Möglichkeiten für eine Handeingabe auch tatsächlich offen zu halten und potentiellen Anwendern anzubieten. Dies führte zu einer Intervention des Drehmaschinenherstellers Pittler bei General Electric, woraufhin die Steuerungen für den deutschen Markt nur noch mit zugänglichen Dateneingabekomponenten geliefert wurden.

auf das Ende der 70er und den Anfang der 80er Jahre datieren. Der Hauptanstoß war ein in diesen Jahren offenkundig schnell steigender Bedarf amerikanischer Anwender an weniger komplexen und flexiblen Steuerungen und NC-Maschinen und ein ständig wachsender Marktanteil ausländischer, vor allem japanischer NC-Anbieter in den USA. Diese Situation hatte in den USA, wie etwa der Report einer "Machine Tool Task Force" belegt (AM, Oktober 1980, S. 105 ff.), offenbar eine relativ intensive Diskussion über erforderliche Entwicklungsschritte im Werkzeugmaschinenbau und bei der NC-Technik in Gang gesetzt. Typisch für diese Entwicklungsphase sind wiederum die Steuerungen des Werkzeugmaschinenherstellers Cincinnati Milacron oder des Steuerungsherstellers Bendix, die weniger komplex auf ein relativ breites industrielles Anwendungsfeld gerichtet waren und die damit an den "down-market"-Prozeß der 60er Jahre anknüpften (Noble 1984, S. 326 f.). Im Vergleich zu den komplexeren CNC-Steuerungen boten diese einfacheren Steuerungstypen ergänzend zu einem zentralen Lochstreifenbetrieb nicht nur relativ weite und direkte Eingabemöglichkeiten schon erstellter Programme, sondern es gab vermehrt auch Steuerungen mit Unterstützungsfunktionen für die direkte Programmierung, wie über Unterprogramme aufrufbare Arbeitszyklen oder verschiedene Formen von Bedienerführung. Dazu wurden die Steuerungen auch zunehmend mit Datenanzeigen der verschiedensten Art bis hin zu alphanumerischen oder grafikfähigen Bildschirmen ausgestattet.

Diese Entwicklung der amerikanischen NC-Technik setzte sich im Verlauf der 80er Jahre fort. Zwar blieben die dominanten Steuerungskonzepte, allen Expertenäußerungen zufolge, relativ komplex und aufwendig, doch verbesserte sich die Werkstattprogrammierbarkeit der Steuerungen nicht unerheblich. Damit näherte sich der ursprünglich auf weitreichende Automatisierung gerichtete Hauptpfad der amerikanischen NC-Technik in immer stärkerem Maße jenem Entwicklungspfad an, der mit begrenzter Automatisierung gekennzeichnet wurde und dem die bundesdeutsche NC-Entwicklung von Anbeginn an folgte.

2. Alternativen bleiben erfolglos

NC-Steuerungen, die demgegenüber dem werkstatorientierten Entwicklungspfad zugeordnet werden können, finden sich in den USA kaum; die-

ser Entwicklungspfad der NC-Technik blieb in den USA, von wenigen Ausnahmen abgesehen, bis heute weitgehend bedeutungslos.

Ohne Frage gab es im Verlauf der Entwicklung eine Reihe von Versuchen mit verschiedenen Konzepten direkt an der Maschine programmierbarer Steuerungen. Nicht zuletzt Nobles Studie machte das Playback-Verfahren bekannt, mit dem in den USA schon Mitte der 40er Jahre experimentiert worden war. 1946/47 wurde die erste funktionsfähige Steuerung dieses Typs auf Betreiben eines Werkzeugmaschinenunternehmens unter der damaligen Beteiligung von General Electric entwickelt und vorgestellt. Mit diesem Verfahren wurden die manuell gesteuerten Operationen zur Herstellung eines Werkstückes mit Hilfe eines Magnetbandes aufgezeichnet, um dann durch das Abspielen der Magnetbanddaten und ihre automatische elektromechanische Umsetzung in Maschinenbewegungen die Herstellung weiterer gleicher Teile zu ermöglichen. Nicht erforderlich waren eine Vorausprogrammierung der Steuerung und die Verwendung der häufig störanfälligen Datenträger wie Lochstreifen nebst Leseeinrichtungen an der Maschine. Die Umsetzung der auf dem Magnetband analog aufgezeichneten Maschinenbewegungen erfolgte jedoch nach gleichen technischen Prinzipien wie bei einer digitalen NC-Steuerung (Noble 1984, S. 143 ff.). Playback-Steuerungen konnten sowohl als komplexe Bahnsteuerungen wie auch als einfachere Strecken- oder Punktsteuerungen ausgelegt sein (Herold u.a. 1971, S. 25).

Zweifellos war das Playback-Verfahren für die komplizierten Fertigungserfordernisse in der Luft- und Raumfahrtindustrie, für die das digitale NC-Konzept des MIT entwickelt worden war, kaum nutzbar. In technischer Hinsicht lag dies darin begründet, daß Werkstücke konventionell-manuell nur bis zu einer bestimmten Komplexitätsgrenze, etwa im Hinblick auf die Zahl der gleichzeitig anzusteuernenden Maschinenachsen, bearbeitbar waren; die Genauigkeit des Playback-Verfahrens war hingegen ausreichend. Darüber hinaus wurden nach wie vor Vorrichtungen, Werkzeughalter und Schablonen benötigt, so daß dieses Verfahren nicht die beabsichtigte Reduktion der steigenden Vorbereitungs- und Betriebsmittelkosten ermöglicht hätte (Noble 1979, S. 28 ff.). Anwendbar war das Playback-Verfahren aber für den weiten Bereich der weniger komplizierten allgemeinen Metallbearbeitung. Noble zufolge war dieses Steuerungsverfahren ein "Fähigkeitsmultiplikator", da damit das beim Maschinenarbeiter verbleibende

Produktionswissen mit Hilfe der Steuerung objektiviert und reproduziert wurde (Paulinyi 1990).⁸

Darüber hinaus gab es jedoch noch eine ganze Reihe weiterer Entwicklungsansätze und Steuerungskonzepte, die mit unmittelbarem Bezug auf die praktischen Erfordernisse des Werkstattbetriebs entworfen wurden. Gemeinsam war diesen Entwicklungen, daß sie fast immer unter maßgeblicher Beteiligung von Werkzeugmaschinenherstellern und weniger von Elektrotechnischen Unternehmen und schon gar nicht mit Beteiligung von wissenschaftlichen Instituten betrieben wurden. Die prinzipiell verfügbaren wissenschaftlichen und technologischen Möglichkeiten wurden selektiv und gezielt für eine an Werkstattbedingungen anpaßbare Technikentwicklung genutzt. Nicht zuletzt zeigte sich das daran, daß schon verfügbare konventionelle und bewährte Automatisierungslösungen durch die Adaption von Elementen der neuen Technik weiterentwickelt und modifiziert wurden.

Beispiele sind verschiedene Steuerungstypen, die teilweise schon auf Entwicklungsansätze aus den 40er Jahren zurückgehen. Die grundlegenden Ziele dieser Entwicklungen waren, einfache und billige Steuerungen zu entwickeln, die die Erfahrung und die Qualifikation des Werkstattpersonals nutzen sollten. So gab es in den 40er und 50er Jahren eine ganze Reihe von Steuerungen mit verstellbaren Nockentrommeln, deren Signale, zumeist sog. Schaltinformationen für Maschinenfunktionen, durch fest verdrahtete Steuerungen übertragen wurden.

Als besonders typisch für derartige Steuerungskonzepte galten auch die früheren Versuche mit "Plugboard"-Systemen, d.h. Steckerfeldsteuerungen, bei denen die Maschinenführer auf einem Steckkontaktschaltpult einer fest verdrahteten Steuerung über das Umstecken und Versetzen von Steckern gleichfalls Maschinenfunktionen ansteuern konnten, während Schlittenwege und Maschinengeschwindigkeiten durch elektrische Schal-

-
- 8 Ganz ohne Frage stellte aufgrund seiner Anwendungsgrenzen das Playback-Verfahren, wie der Technikhistoriker Benad-Wagenhoff in kritischer Wendung gegen Noble in einem Vortrag 1992 in Mannheim anmerkte, für die MIT-Entwickler in den 50er Jahren keine ernsthafte technische Alternative dar. Dies trifft allerdings nur für den spezifischen Anwendungsfall Luft- und Raumfahrtindustrie, nicht jedoch für das Gesamtspektrum der Anwendungsfelder der NC-Technik zu.

ter oder verschiedene Formen mechanischer Anschläge und Nocken reguliert wurden.

Als beispielhaft für ein solches werkstattorientiertes System beschreibt Noble (1984, S. 92 ff.) das System des Elektroingenieurs Caruther, der 1949 eine sehr präzise, automatisch gesteuerte Drehmaschine konstruierte, deren Steuerung aus elektrischen Komponenten aufgebaut war und bei der über ein telefonähnliches Schaltpult Maschinenfunktionen gesteuert werden konnten. Dadurch waren, so Noble, die Programmieraufgaben extrem vereinfacht und konnten von einem normalen Maschinenführer ausgeführt werden. Später wurde daraus das "Specialmatic-System", bei dem das Schaltpult durch ein optisches Datenübertragungs- und Datenspeichersystem ersetzt wurde, das über die Nutzung von Programm-Makros, die auf einem Band eingestanzt werden mußten, gleichfalls vom Maschinenführer programmiert werden konnten. Das System war in der Lage, bis zu vier Maschinenachsen automatisch zu steuern. Trotz einiger Verkäufe Ende der 50er/Anfang der 60er Jahre verlief diese Entwicklung schließlich im Sande.

Solche Steckerfeldsysteme wurden offensichtlich in verschiedenen Ausführungsformen im Verlauf der 60er Jahre in den USA immer wieder aufgegriffen und angeboten (WB 10/1969, S. 726). Eine Variante davon waren beispielsweise auch Wählscheibensteuerungen, über die Programme in Zahlenform in eine fest verdrahtete Steuerung eingegeben werden mußten (dial-in controls) (WB 1/1961, S. 6; Howe 1969).

Als typisches "Plugboard"-System der 60er Jahre wurde von interviewten Experten die Baureihe Telematic für Fräsmaschinen des Werkzeugmaschinenherstellers Cincinnati Milacron bezeichnet, die in verschiedenen Varianten angeboten wurde. Vorgängersysteme bei Cincinnati waren Steuerungen mit Nockentrommeln, deren Signale hydromechanisch übertragen wurden.

Schließlich gab es im Verlauf der 60er Jahre eine Reihe von Steuerungstypen, die die schon angeführten mechanischen Schalter und Eingabeelemente für eine Datenhandeingabe nutzten. Vermutlich wurden diese Dateneingabemöglichkeiten in den meisten Fällen, wie dargestellt, allenfalls komplementär zu einem Lochstreifen- oder Magnetbandbetrieb angeboten, doch läßt das vorliegende Material den Schluß zu, daß es darüber hinaus auch einige Steuerungstypen gab, die ausschließlich für Handeingabe ausgelegt waren. Aufgrund der technischen Restriktionen der Datenspeicherung handelte es sich dabei allerdings um relativ einfache Positioniersteuerungen, mit denen nur wenige Maschinenachsen angesteuert werden konnten (Dyke 1970; Oleston 1970, S. 294 ff.).

Diese in der Bundesrepublik als "Programmsteuerungen" bezeichneten Konzepte zielten auf das breite Anwendungsfeld der zivilen Einzel- bis Kleinserienfertigung, in dem offensichtlich auch die vereinfachten Steuerungen des Hauptpfades aufgrund ihrer Komplexität und hohen Kosten kaum oder bestenfalls in engen Grenzen einsetzbar waren. Wie die Besuche in amerikanischen Betrieben in der ersten Hälfte der 60er Jahre zeigten, fanden solche Steuerungen vor allem in den Bereichen mit ausgesprochener Einzelfertigung in einigen Großbetrieben Verwendung (Stöckmann 1964, S. 24). Obgleich vorliegenden Zahlen zufolge bis 1968 immerhin rd. 10 % aller in den USA produzierten NC-Steuerungen Dial- oder Plugboard-Steuerungen waren (Tab. 3), ist ihre Bedeutung für die NC-Entwicklung in den USA letztlich als nachrangig einzuschätzen; für die Bundesrepublik ist von einer zahlenmäßig höheren Bedeutung solcher Steuerungstypen auszugehen (Kap. V, 2.). Der werkstattorientierte Entwicklungspfad prägte weder die Gesamtentwicklung der NC-Technik in den USA, noch zeigte er selbst eine kontinuierliche technische Entwicklung. Er wurde von ständig wechselnden Entwicklern getragen, um Ende der 60er/Anfang der 70er Jahre weitgehend abzubrechen (Ong 1983; Noble 1984; Collis 1988).

In deutlichem Unterschied zu der deutschen Entwicklung änderte an dieser Situation auch das Aufkommen der CNC-Technik zunächst nichts Grundlegendes. Während in der Bundesrepublik die Potentiale der Mikroelektronik spätestens ab Mitte der 70er Jahre für die Entwicklung leistungsfähiger Handeingabesteuerungen genutzt wurden (Kap. V), gab es in den USA, sieht man von einzelnen und offensichtlich isolierten und nicht realisierten Entwicklungskonzepten auf der Basis der neuen Technik einmal ab (Keene 1971), frühestens Ende der 70er/Anfang der 80er Jahre weithin unter dem Druck der ausländischen Konkurrenz und eines gestiegenen Anwenderinteresses an Werkstattprogrammierung einige wenige Entwicklungsansätze mit CNC-Handeingabesteuerungen, die freilich im Verlauf der 80er Jahre grosso modo keine nennenswerte Bedeutung erlangten.⁹

9 Das in dieser Zeit deutlich gestiegene Interesse vieler NC-Anwender an flexiblen Lösungen belegen auch Untersuchungsergebnisse über die Formen der NC-Organisation in amerikanischen Metallbetrieben. Danach erstellen immerhin 30 % aller Betriebe Programme auch in der Werkstatt (Kelley 1989, S. 239).

Es handelt sich dabei zunächst um Entwicklungsansätze kleinerer Steuerungs- oder Werkzeugmaschinenhersteller, die ausschließlich mit sogenannten "Low-Cost-Steuerungen" für Datenhandeingabe Ende der 70er Jahre auf den Markt kamen (Ong 1983, S. 20 f.). Zu nennen sind die NC-Hersteller Autonumeric, Summit Engineering und neuerdings Anilam Electronics Corp., deren Entwicklungen auf die Initiative von fertigungsorientiert arbeitenden Ingenieuren zurückgehen. Als einziger Werkzeugmaschinenhersteller bietet Hurco Comp. seit Mitte der 70er Jahre begrenzt komplexe, aber überaus komfortable Werkstattprogrammiersteuerungen für die Fräsbearbeitung an. Obgleich nach eigener Einschätzung bis heute ein Nischenproduzent in den USA, gewann dieser Hersteller in den letzten Jahren zunehmend Marktanteile auf dem US-Markt.

Die Steuerungen der Hurco Comp. haben ihren Ursprung in einfachen Positioniersteuerungen für Metallpressen aus den 60er Jahren, deren Funktions- und Bedienungslogik dann in den 70er Jahren für die Entwicklung von Fräsmaschinensteuerungen für drei Achsen und begrenzter Leistungsfähigkeit, aber mit hohem Bedienungs- und Programmierkomfort genutzt wurden. Besonderes Merkmal dieser Steuerungen, die bisher nur als Gesamtsystem zusammen mit relativ einfachen Maschinen des gleichen Herstellers verkauft wurden, ist eine umfassende Programmierunterstützung an der Steuerung durch die Verwendung von zwei Bildschirmen mit alphanumerischer und grafischer Darstellung zur sog. Klartextprogrammierung ("conversational programming"). Die Entwicklungsstrategie von Hurco stellte von Anbeginn an zunächst offensichtlich regional orientiert auf Klein- und Kleinstunternehmer der Zulieferindustrie mit 10 bis 20 Beschäftigten ab, die im mittleren Westen der USA in den letzten 10 bis 15 Jahren offensichtlich an Bedeutung gewonnen haben und für die die meisten NC-Steuerungen aus den USA nicht praktikabel waren. Seit Beginn der 80er Jahre versucht der Hersteller, seine Produkte allerdings auch weltweit anzubieten, so etwa seit 1982 mit wachsendem Erfolg auch auf dem westdeutschen Markt.

Nach übereinstimmenden Expertenangaben gibt es bis heute keinen mit Hurco konkurrierenden Hersteller aus den USA; Hurco sei eine völlige Ausnahme in der Entwicklungsgeschichte amerikanischer NC-Steuerungen (Bild 9).

Neben diesen kleineren Herstellern begannen Anfang der 80er Jahre einige der bekannten NC-Hersteller werkstattprogrammierbare Steuerungen in ihr Programm aufzunehmen. Neben der Steuerungsbaureihe Acramatic 850 des Werkzeugmaschinenherstellers Cincinnati Milacron handelte es sich dabei um Low-Cost-Steuerungen von Allen Bradley der Baureihe 8400, die beide mit einem grafikfähigen Bildschirm ausgestattet waren. Beide Steuerungsbaureihen eigneten sich gleichermaßen für eine direkte

Programmierung mit Hilfe vielfältiger Unterstützungsfunktionen, für ein direkte Eingabe vorab erstellter Programme sowie für die Programmerstellung durch das Playback-Verfahren. Diese Entwicklungsschritte führten auch dazu, daß erstmals 1983/84 amerikanische Handeingabesteuerungen für die Drehbearbeitung auf den Markt kamen. Ende der 80er Jahre schließlich konstatierte die Fachzeitschrift American Machinist, daß immer mehr amerikanische Hersteller relativ billige, an die verschiedensten Fertigungsbedingungen anpaßbare Steuerungen anböten, bei denen eine Zentralprogrammierung nicht mehr notwendig sei (AM, April 1989, S. 11).

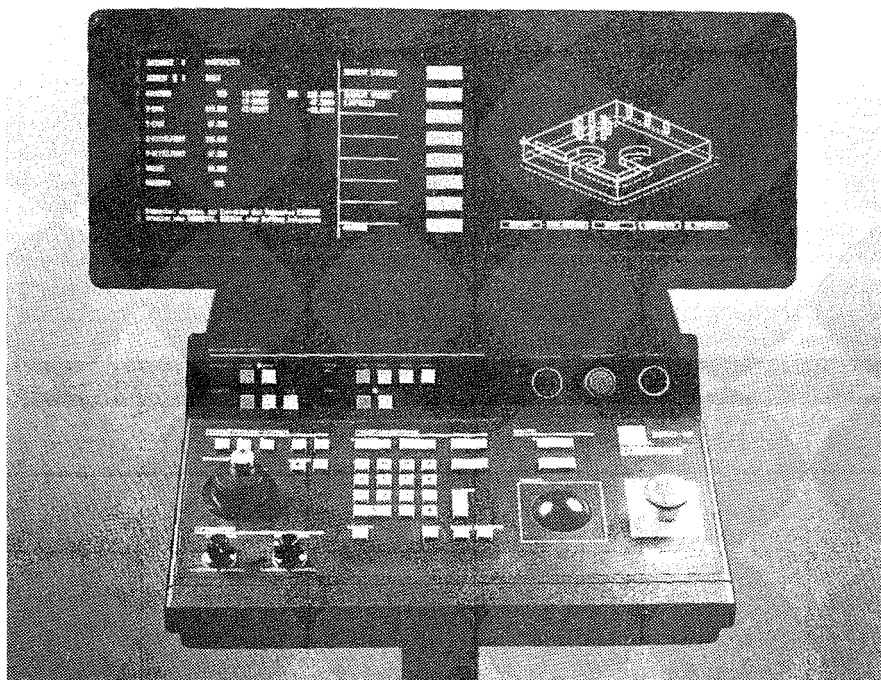


Bild 9: Doppelbildschirmsteuerung "Ultimax" von Hurco 1988
(Werkfoto Hurco)

Freilich hatte sich bis zu diesem Zeitpunkt die Zahl der US-Steuerungshersteller ganz erheblich reduziert. Sie hatten im Verlauf der 80er Jahre

geradezu dramatische Absatzverluste sowohl im Ausland als auch im Inland zugunsten japanischer und zu geringeren Teilen auch westeuropäischer und deutscher NC-Hersteller zu verzeichnen. So verfügte General Numeric, ein 1976 gegründetes Gemeinschaftsunternehmen des japanischen NC-Herstellers Fanuc und von Siemens, schon 1978 in den USA über einen Marktanteil von rd. 12 % (Popken 1979). Neben anderen Faktoren, wie technische Zuverlässigkeit, einem leistungsfähigen Service und einem vergleichsweise niedrigen Preis, begründete sich dieser Erfolg offensichtlich auch auf die im Vergleich zu den US-Steuerungen einfacheren und komfortableren Bedienungs- und Programmiermöglichkeiten an den Steuerungen. Befragte Experten verwiesen auf Vorteile durch Bearbeitungszyklen, aber auch auf die bei den General Numeric-Steuerungen sehr frühe Verwendung von Bildschirmen, die von vielen US-Entwicklern erst später eingesetzt wurden.

Ende der 80er Jahre, nachdem 1985 das Joint Venture von Fanuc und Siemens wieder aufgelöst worden war, verfügte allein Fanuc auf dem amerikanischen NC-Markt über einen Marktanteil von rd. 70 %.¹⁰ Die noch verbliebenen US-Hersteller kooperieren teilweise mit ausländischen Herstellern, wie seit 1986/87 General Electric mit Fanuc oder Allen Bradley mit Olivetti. Weitere US-Hersteller spielen eine nur noch sehr nachgeordnete Rolle. Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre existieren noch einzelne Hersteller, wie besonders Cincinnati Milacron, der ein relativ breites Spektrum von NC-Steuerungen anbietet, oder Hersteller, wie Giddings und Lewis, Kearney and Trecker oder Dynapath, die nach wie vor relativ komplexe Steuerungen für spezialisierte Anwendungsfelder, insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie, entwickeln. Soweit einschätzbar, haben alle übrigen amerikanischen NC-Hersteller die Produktion von Steuerungen aufgegeben. Bei diesem Verdrängungsprozeß amerikanischer NC-Hersteller handelt es sich fraglos um ein wichtiges Moment des generellen Niederganges des US-Werkzeugmaschinenbaus, der in der ersten Hälfte der 80er Jahre einsetzte (Kap. VIII, 4.).

10 Verschieden wird von den befragten Experten die Bedeutung von Siemens, dem größten deutschen NC-Hersteller, auf dem US-Markt eingeschätzt. Während der Anteil am gesamten Steuerungsmarkt gering ist, spielt Siemens offenbar in bestimmten Marktsegmenten spezialisierter NC-Anwendungen auf dem US-Markt eine nicht zu unterschätzende Rolle (March et al. 1989, S. 26).

V. NC-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland

1. Hauptpfad der Entwicklung: Begrenzte Automatisierung

Die Entwicklung der NC-Technik in der Bundesrepublik begann, abgesehen von einigen Vorläufern, Ende der 50er Jahre mit einer zeitlichen Verzögerung von knapp zehn Jahren gegenüber der amerikanischen Entwicklung. Sie orientierte sich, wie nicht anders zu erwarten, zunächst an den amerikanischen Vorbildern, wies jedoch von Anfang an eigenständige Entwicklungsmerkmale auf. Diese Eigenständigkeit betonte nicht zuletzt W. Simon, einer der renommiertesten NC-Experten der 60er Jahre, demzufolge man sich hüten müsse, die amerikanische Entwicklung aufgrund der ganz anderen volkswirtschaftlichen und sozialpolitischen Voraussetzungen unbesehen auf europäische Verhältnisse zu übertragen; man komme daher um ein "Umdenken" der von Amerika gegebenen Anregungen nicht herum (Simon 1963, S. 293).

Die bundesdeutsche NC-Entwicklung folgte in ihren ersten Phasen bis zur Mitte der 70er Jahre dem Entwicklungspfad begrenzter Automatisierung und umfaßte im Vergleich zu den USA eine breitere Palette und weniger komplexe und aufwendige Steuerungssysteme. Wichtigstes Entwicklungskriterium war stets, eine Technik für einen breiten industriellen Anwendungsbereich zu realisieren. Das schloß ein, daß in unterschiedlichem Umfang die Steuerungen mit Möglichkeiten der Datenhandeingabe versehen wurden, die sich in ihrer Auslegung häufig deutlich von amerikanischen Steuerungen der gleichen Entwicklungsphase unterschieden. Diese grundlegenden und generellen Differenzen zur US-Entwicklung belegen nicht zuletzt die Befunde der schon erwähnten Expertenreise in die USA 1963, denen zufolge sich die Tendenz zum Bau von "Einfachmaschinen" mit direkten Programmiermöglichkeiten weniger in den USA als vielmehr in europäischen Ländern, so auch der Bundesrepublik, finden ließ (Simon 1964, S. 48 ff.; Spur 1991, S. 544 ff.). Freilich verstrich eine ganze Reihe von Jahren, bis in der Bundesrepublik tatsächlich ein breit einsetzbares und effizientes Rationalisierungsmittel bereitgestellt werden konnte.

a) Innovationsphase: Suchen und Probieren

Die ersten Versuche mit NC-Steuerungen begannen in der Bundesrepublik in der zweiten Hälfte der 50er Jahre.¹ Diese Steuerungen basierten auf der Digitaltechnologie, liefen auf das in den USA vorherrschende Prinzip einer zentralisierten Programmierung hinaus, und sie galten im Vergleich zum analog arbeitenden Playback-Verfahren aussichtsreicher und zukunftssträchtiger. Allen vorliegenden Informationen, insbesondere den übereinstimmenden Ausführungen der befragten Experten zufolge wurde die erste digitale NC-Steuerung in den Jahren 1956 bis 1958 an der Technischen Hochschule Darmstadt von W. Simon entworfen und gebaut (Politsch 1962; Simon 1962). Technische Basis war eine alte Revolverdrehbank aus Hochschulbeständen. Ausgeführt wurde die Steuerung aus "wirtschaftlichen und pädagogischen Gründen" als Einzelpunktsteuerung. Die Komponenten für die numerische Steuerung, eine Fernschreibeeinrichtung und ein Fernsteuerpult, mußten teilweise selbst gebaut oder umgebaut werden. Den Anstoß für diese Versuchsanordnung erhielt Simon während einer längeren USA-Reise in den 50er Jahren. Bei dieser Maschine wurden alle zur Steuerung der Bewegung notwendigen Kommandos durch Druckknöpfe erteilt; Schaltinformationen wurden auf einem Magnetband gespeichert (Simon 1962, S. 81 ff.); (Bild 10).

Zur gleichen Zeit begannen Werkzeugmaschinenhersteller wie Pittler, Heller und Schiess und Elektrounternehmen, zuvorderst AEG, BBC und Siemens, mit der NC-Technik zu experimentieren (z.B. Uhrmeister 1958; Alich 1958). So entwickelte schon 1957 der Werkzeugmaschinenhersteller Schiess ein Bohr- und Fräswerk mit einer BBC-Steuerung (Spur 1991, S. 542).

1 Auch in der ehemaligen DDR wurde in der zweiten Hälfte der 50er Jahre, aufbauend auf programmgesteuerten Vorläufern, begonnen, digitale NC-Steuerungen zu entwickeln. Der Prototyp einer Fräsmaschinensteuerung wurde ab 1959 erfolgreich erprobt. Im Unterschied zur Bundesrepublik wurden zunächst nur Bahnsteuerungen statt einfache Positioniersteuerungen entwickelt. Ein Grund hierfür liegt - ähnlich wie in den USA - darin, daß durch die staatliche Förderung Marktrisiken entfielen. Zudem nahm offensichtlich die in den 50er Jahren in der DDR stark geförderte Flugzeugindustrie Einfluß auf die Entwicklung dieser Technik. Die ostdeutsche NC-Entwicklung wird bis weit in die 60er Jahre hinein als relativ innovativ angesehen, bevor die Hemmnisse der Planwirtschaft nur noch langsame Fortschritte zuließen (Steiner 1993).

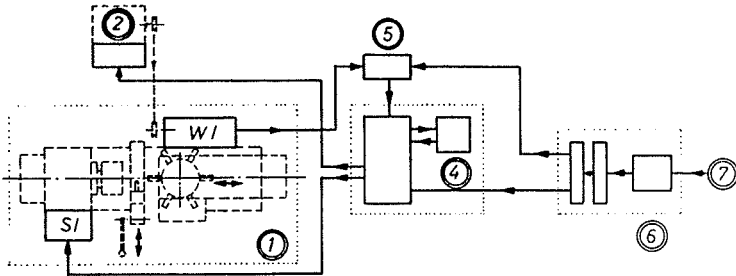
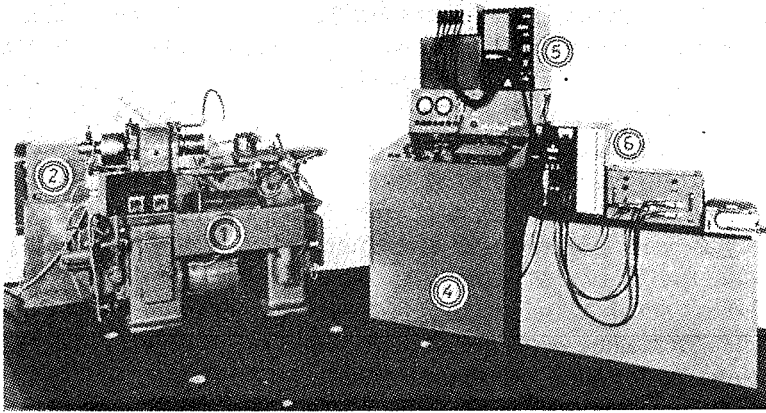


Bild 10: Lehr- und Versuchsanlage für numerische Steuerungen an der Technischen Hochschule Darmstadt 1958²
(Quelle: Simon 1962)

Mit diesen Versuchen begann in der Bundesrepublik eine erste von Ende der 50er bis in die zweite Hälfte der 60er Jahre reichende Entwicklungsphase der neuen Technik, die als Probier- und Suchphase gekennzeichnet werden kann; verschiedentlich werden in der Literatur die damaligen

-
- 2 1 Fernsteuerbare Revolverdrehbank; SI Schaltinformationsteil; WI Weginformationsteil; 2 Fernsteuerbares Schaltgetriebe; 4 Fernsteuerpult; 5 Elektronischer Vorwahlzähler; 6 Lochstreifenleser; 7 Streifenlocher oder Fernschreibmaschine.

Steuerungen als speziellen Entwickler- und auch Anwenderinteressen folgend "handgestrickt" bezeichnet (Pirker u.a. 1970, S. 118). Faktisch ging es in dieser Phase darum, einen eigenständigen, den spezifischen deutschen Verhältnissen angepaßten Pfad der NC-Entwicklung zu finden, ohne dabei den Bezug auf die amerikanische Entwicklung aufzugeben. Da ein an der neuen Technik massiv interessierter "Change Agent" vergleichbar der Air Force fehlte, entwickelte sich in der Bundesrepublik ein nennenswerter Absatzmarkt für die neue Technik nur sehr langsam; die Produktions- und Verbreitungszahlen von NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen stiegen in dieser Phase sehr zögernd und erreichten lediglich geringe Anteile der US-Produktion dieser Maschinen in dieser Zeit (Tab. 1). Anwendung fanden diese neuen Maschinen offensichtlich in sehr unterschiedlichen industriellen Bereichen, wobei ein Schwerpunkt metallbearbeitende Klein- bis Mittelserienfertigung war (Mitthof 1965, S. 479).

Wie die sehr wenigen, erstmals in den Jahren 1959 und 1961 auf den europäischen Werkzeugmaschinenmessen vorgestellten deutschen NC-Maschinen zeigen, wies die neue Technik jedoch schon zu diesem Zeitpunkt einige spezifische Merkmale auf. Es handelte sich bei diesen Maschinen zumeist um Bohrmaschinen mit einfachen Punkt- und Streckensteuerungen für nur ein oder zwei Maschinenachsen, z.B. von AEG und Scharmann. Auch bestand schon damals - neben der üblichen Dateneingabe über Lochstreifen- oder Lochkarten - in einigen Fällen die Möglichkeit einer direkten Eingabe von Koordinatenwerten über Wählscheiben oder Dekadenschalter (WB 2/1961, S. 874 ff.; Simon 1962, S. 12 ff.).

Aus diesen Prototypen und wenigen Pilotanwendungen kristallisierte sich in der ersten Hälfte der 60er Jahre der Hauptpfad der bundesdeutschen NC-Entwicklung heraus, der von nahezu allen an der Entwicklung beteiligten Herstellern verfolgt wurde. Es handelte sich dabei um Entwickler und Hersteller aus dem Werkzeugmaschinenbau, wie Scharmann, Index und Boehringer, wie auch aus der Elektrotechnischen Industrie, wie SEL, BBC, AEG und SSW (Siemens-Schuckert-Werke), deren Zahl sehr schnell anstieg. Während Anfang der 60er Jahre lediglich vier inländische Steuerungshersteller gezählt wurden, stieg die Zahl bis 1965 auf 17 an (Mickler u.a. 1977, S. 265). Offensichtlich fehlte aber über lange Jahre hinweg ein dominanter Hersteller, der den Verlauf der Technikentwicklung stärker beeinflusste. Gleichwohl waren gemeinsame Merkmale der

westdeutschen NC-Entwicklung erkennbar, die sich teilweise deutlich von der in den USA unterscheiden:

(1) Die frühen Entwickler konzentrierten sich auf einfache und vergleichsweise leicht nutzbare Punkt- und Streckensteuerungen, und es fand eine nur sehr zögernde Zunahme der Komplexität der Steuerungen durch eine Steigerung des Speicher-, Rechen- und Programmieraufwandes statt (Pirker u.a. 1970, S. 164). Insbesondere die Entwicklung einfacher Punkt- bzw. Positioniersteuerungen für die Bohr- und Fräsbearbeitung einfacher Teile in kleinen bis mittleren Serien, die häufig nur Weginformationen und keine Schaltinformationen verarbeiteten, gilt für viele Experten bis heute als der Einstieg in die westdeutsche NC-Entwicklung (Pirker u.a. 1970, S. 126; Heller 1991). Dies zeigt sich quantitativ daran, daß bis 1965 95 % aller NC-Steuerungen aus der Bundesrepublik Punkt- oder Streckensteuerungen waren (Tab. 3); folgt man den Ergebnissen einer Umfrage unter den Ausstellern anläßlich der Europäischen Werkzeugmaschinenmesse 1965, so waren mehr als 25 % der angebotenen Werkzeugmaschinen mit Punktsteuerungen, fast 60 % mit Streckensteuerungen und lediglich 15 % mit Bahnsteuerungen ausgerüstet.³ Diese Entwicklung beschränkte sich nicht nur auf die Fräs- und Bohrbearbeitung, sondern umfaßte auch die von der US-Entwicklung zunächst kaum berücksichtigte Drehbearbeitung. So wird als erste NC-gesteuerte Drehmaschine eine Schwerdrehmaschine des Werkzeugmaschinenherstellers Waldrich Siegen, ausgestattet mit einer AEG-Steuerung, angesehen (Frick 1991, S. 346).

Ohne Frage ist eine Ursache für diesen Einstieg in die NC-Entwicklung das damals in der Bundesrepublik nur wenig vorhandene technischen Know-how für komplexe Steuerungen, wie es für Bahnsteuerungen erforderlich gewesen wäre. Verfügbar waren zudem nur die Röhren- und Relais-technik, und erst schrittweise konnten die Entwickler auf die Transistor- und Halbleitertechnik übergehen, um damit die Leistungsfähigkeit der Steuerungen steigern zu können (Stromberger 1966, S. 598). Doch stand hinter diesem Entwicklungsweg unzweifelhaft auch das Interesse, leicht einsetzbare Steuerungen für möglichst breite und unterschiedliche Anwendungsfelder der Metallbearbeitung zu konzipieren. Im Unterschied zu den USA richtete sich die NC-Entwicklung von Anbeginn an auf zivile Anwendungsfelder im Inland und aufgrund der seit jeher hohen Export-

3 Eigene Berechnungen nach Mitthof (1965).

orientierung des Werkzeugmaschinenbaus auch auf Anwendungsfelder im Ausland. Es gab in der Bundesrepublik im Unterschied zu den USA in dieser Zeit - wie auch in allen späteren Entwicklungsphasen - keine Förderinstitution und keine nennenswerten Anwender, die bereit gewesen wären, die Kosten hoch komplexer Steuerungslösungen zu tragen. Diese Anwendungsinteressen erklären auch die Orientierung der Steuerungsentwicklung weniger an geometrischen als vielmehr an technologischen Problemen der Bearbeitung wie die Festlegung von Werkzeugen oder die Spezifizierung von Materialeigenschaften und daraus resultierende Bearbeitungsdaten für Maschinenvorschübe oder Maschinendrehzahlen.

(2) Mit dieser vergleichsweise geringen Komplexität der ersten Steuerungen verbindet sich ein weiteres Charakteristikum der bundesdeutschen NC-Entwicklung. Die aufgrund der begrenzten Komplexität der Steuerungen technisch prinzipiell gegebenen Möglichkeiten für die Handeingabe von Daten (Kap. III, 3.; Simon 1963, S. 32) wurden offensichtlich genutzt, und es zeichneten sich in der Bundesrepublik relativ frühzeitig Steuerungsentwicklungen ab, die eine direkte Dateneingabe vorsahen. Damit konnte eine unter den damaligen Bedingungen relativ große Einsatzflexibilität von NC-Maschinen erreicht und ihre Anpaßbarkeit an Bedingungen sehr verschiedener Produktionsprozesse gewährleistet werden (Bild 11).

Obleich die Standardsteuerungen der 60er Jahre grundsätzlich auf eine zentrale Programmierung und eine Dateneingabe über Lochstreifen ausgelegt waren, und der automatische Programmablauf vor allem bei den ersten Bahnsteuerungen faktisch auch nicht zu beeinflussen war,⁴ wurde sehr bald an einer Reihe von Steuerungstypen die Möglichkeit des "Operatings" - wie sich ein Experte ausdrückte - geschaffen. Soweit eine Einschätzung möglich ist, wurden derartige Konzeptionen früher realisiert als in den USA, und sie gingen auch weiter: Während in den USA derartige Möglichkeiten, wie dargestellt (Kap. IV), vielfach nur als Zusatzkomponente angeboten wurden, waren sie bei den bundesdeutschen Steuerungen in der Regel fester Bestandteil der Steuerungskonzepte. So wurde bei

-
- 4 Dem Konzept einer ausschließlich zentralen Programmierung folgend, ging daher beispielsweise Simon in seinem ersten NC-Lehrbuch von einer massiven Aufwertung der betrieblichen Planungsbereiche und einer "Zusammenballung aller im bisherigen Fertigungsprozeß getrennt arbeitender Fachleute - Konstrukteure, Arbeitsvorbereiter, Maschineneinrichter usw. - in den Arbeitsvorbereitungsbüros" aus (Simon 1963, S. 156).

Punktsteuerungen verschiedener großer NC-Entwickler, beispielsweise AEG, Philips oder dem Werkzeugmaschinenhersteller Scharmann, schon Anfang der 60er Jahre alternativ zum Lochstreifenbetrieb eine Datenhandeingabe über Schalter und Tasten offeriert (WB 94/1961, S. 847 ff.). Handelte es sich dabei um Steuerungen für einfache Bearbeitungsprozesse, so fanden sich später auch bei Streckensteuerungen und schließlich bei komplexen Bahnsteuerungen Möglichkeiten für eine Eingabe einzelner Daten und Korrekturwerte sowie die Modifikation von Schnittwerten direkt an der Steuerung. Resümiert man die Berichte über den Stand der NC-Entwicklung, so kann festgestellt werden, daß Mitte der 60er Jahre alle größeren NC-Hersteller Steuerungen mit solchen Handeingabemöglichkeiten anboten (z.B. Schulz 1964; Schulz, Eibeck 1964; Mitthof 1965; Kohring 1966).

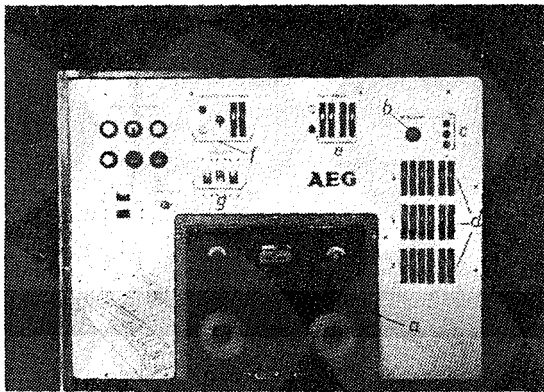


Bild 11: Bedienungstafel einer NC-Steuerung für Lochstreifenbetrieb 1962⁵

(Quelle: Simon 1963)

So waren Siemens-Steuerungen Mitte der 60er Jahre mit einer expliziten Betriebsart Handeingabe für Koordinatenwerte, Werkzeugkorrekturen und Nullpunktverschiebungen sowie einer Ziffernanzeige für Werkzeuge und NC-Sätze ausgestattet. Auch bot Siemens eine "Korrektureinrichtung" an, über die Maßkorrekturen eingegeben werden konnten, nachdem durch in den Lochstreifen

5 a Lochstreifenspule; b Lochstreifenabtaster; numerischer Werkzeuglängenausgleich; d numerische Werkzeugdurchmesser-Einstellung; e Vorschubwahlschalter; f Wahlschalter für Betriebsarten.

einprogrammierte Stoppsignale der automatische Bearbeitungsprozeß gestoppt worden war (WB 4/1967, S. 309 f.). Dabei handelt es sich um Standardmerkmale vieler Steuerungen bundesdeutscher Hersteller wie z.B. Masing, Grundig, AEG oder Philips, die durch Zusatzeinrichtungen wie die Anzeige von Soll- und Ist-Werten oder die Eingabemöglichkeit einzelner NC-Sätze ergänzbar waren; Eingriffsmöglichkeiten in Vorschub- und Drehzahlwerte waren offensichtlich obligatorisch (Stromberger 1966; WB 12/1964, S. 833 ff.); (Bild 12).

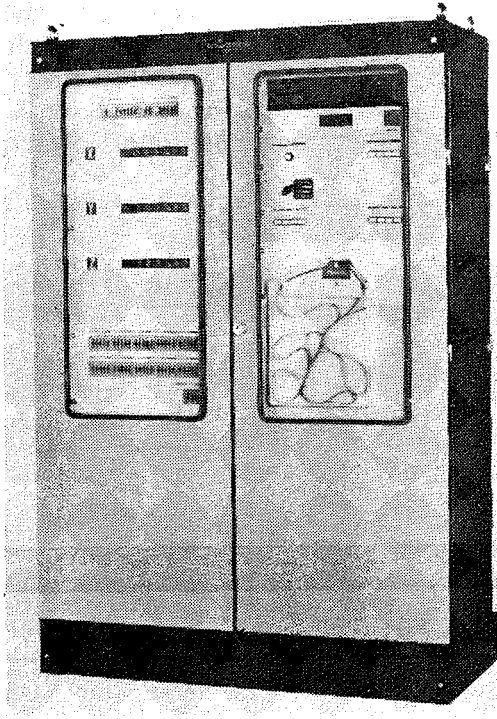


Bild 12: Zwei- bis Vier-Achsen-Streckensteuerung für die Fräsbearbeitung von Masing (später Bosch), die zwischen 1964 und 1970 verkauft wurde⁶

(Werkfoto Masing)

(3) Mit diesen für ein breites Anwendungsfeld entwickelten Steuerungen verband sich als drittes Merkmal der Entwicklung eine relativ fertigungs-

⁶ Die Eingriffsmöglichkeiten umfaßten unter anderem: Längenkorrekturen, Nullpunktverschiebungen und Achsenverschiebungen.

nahe und gleichfalls auf eine breite Nutzbarkeit abgestellte Konzipierung von Programmiersprachen und Programmiersystemen; ihre Entwicklung setzte in der ersten Hälfte der 60er Jahre ein. Im Unterschied zu den USA wurden in der Bundesrepublik sehr verschiedene verfahrens- und technologieorientierte Programmiersprachen entwickelt. Die Übernahme des US-Systems APT fand in größerem Stil lediglich in der sich in den 60er Jahre allmählich in der Bundesrepublik etablierenden Luftfahrtindustrie statt, so gut wie nicht jedoch in der allgemeinen Metallverarbeitung. So wurden auf Initiative einzelner Werkzeugmaschinenhersteller in Kooperation mit Elektrotechnischen Unternehmen spezielle verfahrensgebundene Programmiersprachen entwickelt, die bei weitem nicht die Komplexität und Schwerfälligkeit des APT-Systems aufwiesen und die vor allem nicht unbedingt an den Einsatz von Großrechnern gebunden waren.

Typisch hierfür war das System Autopit, das in der ersten Hälfte der 60er Jahre von dem Drehmaschinenhersteller Pittler zusammen mit IBM entwickelt wurde und das gleichsam als Gesamtsystem zusammen mit einer neu entwickelten NC-gesteuerten Futterdrehmaschine auf den Markt gebracht wurde (WB 12/1964, S. 833 ff.).

In diesem Rahmen fand auch die Entwicklung des derzeit noch verhältnismäßig weit verbreiteten Programmiersystems EXAPT (Extended Subset of APT) statt (Grupe 1974; Grupe, Hamacher 1988): Unter Nutzung der formalen und syntaktischen Grundlagen des US-Systems APT und auf der Basis der 1965 erfolgten Normung der NC-Programmiersprache (DIN 66025) und des 8-Kanal-Lochstreifens als wichtigsten Datenträger wurde mit EXAPT 1965/66 die Entwicklung eines technologieorientierten Programmiersystems begonnen, das nach einer ganzen Reihe von Entwicklungs- und Anlaufschwierigkeiten schließlich in drei verschiedene verfahrensorientierte Systemvarianten mündete.

EXAPT fand in der Bundesrepublik allerdings nur sehr zögernde Verwendung, und es bedurfte nach der Entwicklung der ersten Systemvariante offenbar größerer Anstrengungen, das System den verschiedensten Einsatzbedingungen anzupassen. Einer der Gründe liegt wohl darin, daß das System, ähnlich wie in den USA, zunächst ausschließlich unter informationstechnischen und datenlogischen Aspekten im wesentlichen von verschiedenen wissenschaftlichen Instituten in großer Distanz zu potentiellen Anwendungsbereichen entwickelt wurde. Die EXAPT-Entwicklung stellt dabei, so interviewte Experten, einen der wenigen konzeptionellen Beiträge des Wissenschaftsbereichs der Bundesrepublik zur NC-Entwicklung dar.

Aufgrund der über lange Zeit vergleichsweise geringen Komplexität der meisten deutschen Steuerungen wurden für kompliziertere Anwendungserfordernisse, wie etwa bei Drehmaschinen oder den damals ersten Bearbeitungszentren, wo Bahnsteuerungen erforderlich waren, häufig amerikanische Steuerungen eingesetzt. Ihr Import stand im Rahmen des in den 50er und 60er Jahren insgesamt gesehen relativ hohen amerikanischen Anteils an den gesamten Werkzeugmaschinenimporten in die Bundesrepublik, der sich damals teilweise auf über 30 % belief (Tab. 5). Vor allem fanden sich in der Bundesrepublik Steuerungen von General Electric, die zwischen 1960 und 1974 einen Marktanteil von rd. 18 % in der Bundesrepublik aufwiesen, als auch in geringerem Maße Steuerungen von Bendix und Cincinnati Milacron. Bei Drehmaschinen verfügte in dieser Zeit General Electric über einen durchschnittlichen Marktanteil von über 40 % (Clausnitzer 1974, S. 18) und galt über lange Jahre hinweg in diesem Anwendungssegment als die "Nr. 1" vor Siemens; alle großen Drehmaschinenhersteller wie Index oder Boehringer statteten die überwiegende Zahl ihrer Maschinen mit Steuerungen dieses Herstellers aus. Wichtig ist allerdings, daß es sich bei diesen amerikanischen Steuerungen nicht um jene besonders komplexen Typen handelte, die für die US-Entwicklung bestimmend waren, sondern um relativ preiswerte, in ihrer Komplexität be-

Jahr	aus den USA	aus Japan
1959	34,0	-
1965	23,5	0,3
1970	12,3	-
1975	8,0	3,2
1980	6,3	12,0
1985	6,8	16,7
1987	4,6	12,8
1990	5,0	15,0
1991	6,0	12,0
1992	5,0	11,0
Quellen: VDMA, versch. Jahrgänge; VDW; eigene Berechnungen		
Tabelle 5	Import von Werkzeugmaschinen aus den USA und Japan in die BRD; Anteil am Gesamtimport von Werkzeugmaschinen in %	

grenzte Steuerungen für zwei bis drei Maschinenachsen. Expertenangaben zufolge wurden amerikanische Steuerungen vor allem in Hinblick auf leichte direkte Eingriffsmöglichkeiten teilweise speziell für den deutschen Markt modifiziert.

Die Steuerungen von General Electric ließen sich in der Bundesrepublik und Westeuropa aufgrund ihres relativ günstigen Preises und ihres Leistungsvermögens sehr gut verkaufen. Es handelte sich dabei um die Bahnsteuerung Mark Century 100 S. An dieser Steuerung waren über Dekadenschalter die Handeingabe von Korrekturwerten für vier Werkzeuge sowie eine Regelung der Schnittwerte möglich. Zusätzlich gab es eine Datenanzeige für Soll- und Ist-Werte (WB 12/1969, S. 728). Fräsmaschinensteuerungen von Cincinnati waren als Low-Cost-Systeme speziell für europäische Anforderungen ausgelegt und zeichneten sich durch Handeingabemöglichkeiten und Zyklenprogrammierung aus (WB 12/1971, S. 880 ff.).

b) Diffusion und Weiterentwicklung

Im Verlauf der zweiten Hälfte der 60er Jahre mündete die Innovationsphase in die Phase einer immer breiteren Diffusion der neuen Technik. Obgleich nach wie vor teuer und mit vielen Einsatzproblemen behaftet, hatte die NC-Technik in Hinblick auf ihre technische Zuverlässigkeit wie auch ihre rationelle Anwendbarkeit in der Mittelserienfertigung größerer Betriebe offensichtlich viele ihrer Anlaufschwierigkeiten überwunden. Die Entwicklungsanstrengungen richteten sich jetzt auf die Verbesserung des erreichten Standes der fest verdrahteten "konventionellen" NC-Technik (Pirker u.a. 1970, S. 124 ff.). Von befragten Experten wird der Beginn dieser zweiten Entwicklungsphase auf die Jahre 1967/68 datiert. Etwa ab 1968/69 kann von einem sich beschleunigenden Wachstum der NC-Verbreitung gesprochen werden: Indiz sind die Produktionszahlen von NC-Maschinen, die allein von 1968 auf 1969 von rd. 1.500 auf mehr als 2.000 stiegen (Tab. 1); die Exportquote lag dabei mit rd. 45 % sehr deutlich über der in den USA produzierten NC-Maschinen, die 1968 knapp 5 % betrug.⁷

7 VDW nach Pirker u.a. 1970, S. 124; eigene Berechnungen nach United States Department of Commerce 1969, S. 17. Die Exportquoten von Steuerungen allein hingegen dürften aufgrund der damaligen Dominanz der US-Steuerungen nicht so große Differenzen aufweisen. So wurden in sehr vielen Fällen für den Export bestimmte westdeutsche NC-Maschinen mit US-Steuerungen ausgestattet (Pirker u.a. 1970, S. 116).

Es reduzierte sich allerdings die Zahl der Steuerungshersteller deutlich. 1968 lieferten fünf deutsche Steuerungshersteller für rd. 42 % der Inlandsproduktion an NC-Maschinen die Steuerungen (Pirker u.a. 1970, S. 118). Für die NC-Entwicklung einzelner Hersteller spielten vermutlich auch in diesem Zeitraum erstmals spezifische Anforderungen aus der expandierenden zivilen und militärischen Luftfahrtindustrie eine gewisse Rolle und führten zu der intensivierten Entwicklung von Bahnsteuerungen.⁸ Insgesamt gesehen blieb allerdings der Anteil der in dieser Branche abgesetzten NC-Maschinen im Vergleich zu den USA äußerst gering. Im Unterschied zu den weit höheren Anteilen in den USA, die - wie schon angeführt - sich auf durchschnittlich bis zu 30 % beliefen, erreichte der entsprechende Anteil in der Bundesrepublik seit Ende der 50er Jahre lediglich 1,7 % (Tab. 4).

Maßgebliche inländische Steuerungshersteller waren damals unter anderem AEG, Olivetti, Masing bzw. später Bosch, Philips, Grundig sowie vor allem Siemens. Siemens verkaufte NC-Steuerungen allerdings erst ab 1964. In den Jahren zuvor experimentierte dieses Elektrotechnische Unternehmen lediglich mit der neuen Technik und setzte NC-gesteuerte Maschinen in eigenen Fertigungsbereichen ein. Bei der ersten kommerziellen Siemens-Steuerung handelte es sich um eine Streckensteuerung. 1965 wurde die erste dreiachsige Bahnsteuerung auf den Markt gebracht. Voraussetzung war eine 1963 begonnene Kooperation mit dem japanischen Steuerungshersteller Fanuc, dessen Steuerungskonzepte von Siemens teilweise übernommen und modifiziert wurden (Siemens 1973, S. 30 f.).

Neben den Herstellern aus der Elektrotechnischen Industrie gab es aber auch nach wie vor noch einige Werkzeugmaschinenhersteller wie z.B. Heller, Scharmann oder Fritz Werner, die spezialisierte NC-Steuerungen für die eigenen Werkzeugmaschinenkonzepte entwickelten und anboten.

Die Steuerungshersteller aus dem Werkzeugmaschinenbau hatten freilich nur einen vergleichsweise geringen Anteil am NC-Markt in der Bundesrepublik. So betrug in den Jahren 1960 bis 1974 der durchschnittliche Anteil von Scharmann rd. 6 % und von Fritz Werner ca. 2 %. Den größten Marktanteil hatte in diesem Zeitraum Siemens mit ca. 25 %, AEG und Bosch wiesen einen Anteil von ca. 13 % und 6 % auf. Wie schon angeführt, waren amerikanische Hersteller damals

8 Verwiesen wird auf das MRCA- bzw. Tornado-Projekt, den Alpha-Jet und die anlaufende Airbus-Produktion, durch die die Herstellung großer und komplexer NC-Maschinen beschleunigt wurde (Kief 1991).

stark auf dem deutschen Markt vertreten: General Electric verfügte über einen Anteil von ca. 18 % und Cincinnati von etwa 5 % (Clausnitzer 1974, S. 17 ff.).

Diese Entwicklungsphase der NC-Technik war von einer wachsenden Bedeutung komplexerer Steuerungen, das heißt Bahnsteuerungen und Mehrachsensteuerungen gekennzeichnet. Erkennbar ist dies am wachsenden Anteil von Bahnsteuerungen an der Gesamtzahl der in der BRD hergestellten NC-Steuerungen, der von rd. 19 % 1966 auf ca. 30 % 1969 anstieg (Tab. 3). Damit erreichte die bundesdeutsche NC-Entwicklung allmählich das Entwicklungsniveau der bis dahin den westdeutschen und europäischen Markt dominierenden Bahnsteuerungen der USA. Vermutlich nicht zuletzt aus diesem Grund gingen in der ersten Hälfte der 70er Jahre die amerikanischen Steuerungsimporte deutlich zurück.

Dies gilt vor allem für die Bahnsteuerungen der Baureihe Mark Century von GE, die in der ersten Hälfte der 70er Jahre innerhalb kurzer Zeit ihren bis dahin relativ hohen Marktanteil bei Drehmaschinen verloren. Expertenangaben zufolge wurden diese Steuerungen von dem seit 1969 neuen Siemens-System 500 verdrängt, das ähnlich leistungsfähig, jedoch billiger und aufgrund eines besseren Services für deutsche und westeuropäische Anwender zuverlässiger war.

In Hinblick auf die Programmierbarkeit der Steuerungen war die bundesdeutsche Entwicklung dieser Zeit, ähnlich wie in den USA, davon gekennzeichnet, die Effektivität einer Zentralprogrammierung zu verbessern. Zu nennen sind zum einen die Weiterentwicklung des Programmiersystems EXAPT und die Entwicklung einer Vielzahl weiterer universell wie auch nur für spezielle Anwendungsfelder nutzbarer Programmiersysteme. Zum anderen wurden Ende der 60er Jahre die ersten Steuerungen mit Arbeitszyklen angeboten, die als Unterprogramme in den Steuerungen gespeichert waren und in Programme integriert werden konnten, wodurch die Länge zentral erstellter Programme nicht unerheblich gekürzt werden konnte (Pirker u.a. 1970, S. 85 f.). Nach Ansicht der befragten Experten erleichterte die spezifische Technologieorientierung der westdeutschen NC-Technik die vergleichsweise frühe Entwicklung von Arbeitszyklen, die wiederkehrende Bearbeitungsoperationen wie Gewindeschneiden oder das Fräsen von Nuten umfaßten. Schließlich waren die Verwendung verbesserter Lochstreifenleser, erste Versuche zur ständigen Optimierung des Maschinenlaufs über Adaptive-Control-Systeme sowie die zentrale Rechnerdirektführung mehrerer NC-Maschinen durch Prozeßrechner in diesem Zusammenhang von Bedeutung. So wurden etwa zur gleichen Zeit wie in den USA 1970 von AEG und von Siemens auf einer europäischen Werk-

zeugmaschinenausstellung erstmals Systeme der Rechnerdirektführung (DNC) vorgeführt (Herold u.a. 1971, S. 391 ff.).

Zugleich wurden aber ständig auch die Möglichkeiten für die Datenhandeingabe erweitert, um auch auf diesem Wege einen optimalen Maschinenlauf zu gewährleisten. Handeingabe einzelner Programmelemente, die Regulierbarkeit der verschiedensten Bearbeitungsparameter und Positionsanzeigen der Maschinenbewegungen waren inzwischen Standardausrüstung nahezu sämtlicher gängiger Steuerungstypen (WB 10/1969, S. 728). Darüber hinaus wurden der Umfang der direkt eingebbaren Daten, die Zugriffsbreite auf das Lochstreifenprogramm, um falsche Daten korrigieren zu können, sowie die Anzeige der in Zwischenspeichern gespeicherten NC-Sätze erweitert. Sieht man einmal von den auf dem europäischen Markt verkauften US-Steuerungen ab, so gingen nach den Einschätzungen befragter NC-Experten diese Handeingabemöglichkeiten weiter als die an vergleichbaren US-Steuerungen. Dies galt fraglos für die von Werkzeugmaschinenherstellern angebotenen Steuerungen. Offensichtlich galt dies aber auch für Siemens-Steuerungen, obgleich sie von Experten häufig als "amerikanische" Steuerungen angesehen wurden.

Als typisches Beispiel kann die Steuerungsbaureihe 500 angesehen werden, die bis weit in die 70er Jahre hinein ständig weiterentwickelt wurde (Gurtner, Müller 1973). Es handelte sich dabei um eine Universalsteuerung, die ursprünglich als Punkt- und Streckensteuerung ausgelegt war, aber auch zu einer Bahnsteuerung erweitert werden konnte. Obgleich für einen Lochstreifenbetrieb vorgesehen, konnten im Prinzip an dieser Steuerung sämtliche Programminformationen von Hand über Dekadenschalter eingegeben werden. Dabei konnte allerdings immer nur ein Programmsatz gespeichert werden. Darüber hinaus verfügte die Steuerung über eine Satzanzeige sowie über eine größere Zahl von Schaltern zur Nullpunktverschiebung und für Werkzeugkorrekturen (Baisch u.a. 1970).

Auf die besonders bedienerfreundlichen Steuerungen der Werkzeugmaschinenhersteller weist ein Messebericht von 1970 hin und führt als Beispiel für eine solche Steuerung die NC 7000 von Fritz Werner/Berlin an (WB 12/1970, S. 981).

2. Werkstattorientierte Steuerungen als mögliche Alternative

Die Versuche mit werkstattprogrammierbaren Werkzeugmaschinensteuerungen begannen schon einige Jahre, bevor die ersten zentral programmierbaren Steuerungen entwickelt wurden und lassen sich in der Bundes-

republik bis zum Beginn der 50er Jahre zurückverfolgen. Experimentiert wurde zunächst mit Konzeptionen, die sich mit großer Wahrscheinlichkeit an den amerikanischen Playback-Versuchen der damaligen Zeit orientierten.⁹ Bekannt geworden ist der Entwurf von Schmid, damals Ingenieur bei AEG, der auf der Weiterentwicklung von elektrischen Nachformsteuerungen an Drehmaschinen und der elektromagnetischen Speicherung von Bearbeitungsinformationen zu einer "Einprägsteuerung" basierte. Technische Basis dieser Steuerung war die analoge Aufzeichnung von Steuerbefehlen in Form elektromagnetischer Schwingungen auf einem Magnetband (Schmid 1952; Häuser 1984). Mit ihr verband sich explizit das Konzept, die Maschinensteuerung nur begrenzt zu automatisieren, um damit Universalität und Flexibilität gegebener Werkzeugmaschinenkonzepte und die Qualifikation von Maschinenfacharbeitern zu erhalten (Schmid 1952, S. 236 ff.). Wie auch in späteren Jahren noch betont wurde, könne bei diesem System ein guter Facharbeiter gleichzeitig Einrichter, Programmierer und Maschinenbediener sein und mehrere Maschinen gleichzeitig in Betrieb halten und überwachen (Simon 1963, S. 292). Dieser Steuerungsentwurf, der als Drehmaschinensteuerung 1951 auf der Europäischen Werkzeugmaschinenausstellung vorgestellt wurde, fand offenbar keine Weiterentwicklung, er wurde jedoch im Verlauf der 50er Jahre an der Technischen Hochschule Aachen aufgegriffen und mehr oder weniger systematisch erprobt (Opitz u.a. 1958; Uhrmeister 1956; Simon 1962, S. 26 f.). Aus der gleichen Zeit datiert eine der ersten Handeingabesteuerung: Nach Expertenangaben wurde 1952 von einer Berliner Werkzeugmaschinenfabrik (Schwartzkopff) ein über Dekadenschalter programmierbares und über ein mechanisches Walzen-Nocken-System gesteuertes Koordinatenbohrwerk vorgestellt.

a) Allmähliche Diffusion werkstatorientierter Steuerungen

Das vorliegende Material läßt den Schluß zu, daß die werkstatorientierten Versuche mit der NC-Technik seit den 50er Jahren, im Vergleich zu ähnlichen Konzepten in den USA, in der Bundesrepublik kontinuierlicher und systematischer verfolgt wurden. Im Rahmen einer kurzen Innovationsphase wurden anwendungsreife Systeme entwickelt, die sich offenkun-

9 Diese spezifischen Verbindungen zwischen der amerikanischen und deutschen NC-Entwicklung können nur vermutet werden und sind noch wenig aufgeklärt.

dig relativ schnell verbreiteten. Dies betraf zunächst das Playback-Verfahren, das in den 60er Jahren wieder aufgegriffen und in Form sogenannter Repetiersteuerungen weiterentwickelt wurde. Obgleich diese Steuerungsart bestenfalls als Zwischenschritt zur digitalen NC-Technik angesehen wurde (Simon 1963, S. 292), galt sie in den 60er Jahren als vergleichsweise billige Alternative zu zentral programmierten NC-Maschinen, da die teuren und störanfälligen Steuerungskomponenten zum Einlesen der Lochstreifen und Umsetzen der Lochstreifendaten wegfielen und lediglich Elemente für den steuerungsinternen Soll-Ist-Vergleich sowie eine Aufzeichnungsmöglichkeit der Maschinenbewegungen, etwa ein Magnetband, notwendig waren. Allen vorliegenden Befunden zufolge fand dieses Steuerungsverfahren sowohl in der Fertigung mittlerer Serien als auch in der Kleinserienfertigung Verwendung.

Im einzelnen sind beispielsweise Drehmaschinensteuerungen der Werkzeugmaschinenhersteller Heyligenstaedt und Wohlenberg sowie Fräsmaschinensteuerungen des Werkzeugmaschinenunternehmens Fritz Werner zu nennen (WB 94/1961, S. 896 ff.; WB 97/1964, S. 833 ff.; WB 98/1965, S. 898 ff.). Daneben ist das "automatische Positionierverfahren einer Koordinatenbohrmaschine" Anfang der 60er Jahre bekannt geworden, bei dem jeweils 20 Tisch- und Bohrschlittenstellungen auf zwei Magnetwalzen gespeichert werden konnten. Die Walzen konnten beliebig ausgetauscht werden, so daß die Bearbeitungsprogramme für Wiederholteile oder einzelner Arbeitszyklen ständig verfügbar waren (Kohring 1962).

Daneben gewann zunehmend die Handeingabe von Daten an den Steuerungen an Bedeutung. Damit wurde an eine damals ganze Reihe existierender Bauformen mechanischer Steuerungen von Werkzeugmaschinen angeknüpft, bei denen das Ein- und Ausschalten von Maschinenfunktionen im Verlauf einer Bearbeitungsoperation durch Bauelemente wie Nocken, Endschalter oder feste Anschläge erreicht wurde. Durch die Ergänzung solcher Steuerungen mit Elementen der NC-Technologie und ihrer Weiterentwicklung zu "Programmsteuerungen" oder "teilnumerischen Steuerungen" (Stromberger 1966) wurden sie nicht nur in Hinblick auf ihre Kapazität für die Informationsverarbeitung weiterentwickelt, sondern auch in Hinblick auf ihre Programmierbarkeit flexibilisiert und vereinfacht, da dadurch das bei rein mechanisch gesteuerten Maschinen überaus zeitaufwendige Umrüsten erheblich vereinfacht wurde.

Als Speichermedium solcher Werkstattsteuerungen dienten, ähnlich wie bei den Plugboard-Steuerungen in den USA, zumeist mechanische Kom-

ponenten wie Dekadenschalter, Kreuzschienenverteiler oder Programmwalzen, auf denen Schaltinformationen gespeichert und mit den damals verfügbaren elektrischen Hilfsmitteln in Steuerungssignale umgesetzt wurden; die Maschinenwege wurden wie zuvor durch Anschläge oder Nocken festgelegt (Weck 1982, S. 100 ff.). Ein Lochstreifenbetrieb wurde verschiedentlich als ergänzende Funktion an den Steuerungen angeboten. Obgleich im praktischen Einsatz auch diese Steuerungen vielfach im Büro programmiert wurden, indem dort die Programmträger, etwa Folien für Steckerfelder, erstellt wurden, blieben diese Vorgaben aufgrund der spezifischen Dateneingabelemente unmittelbar dem Werkstattpersonal zugänglich. Mit diesen Steuerungen verband sich daher, so ein befragter Experte, "naturwüchsig" ihre Werkstattprogrammierbarkeit, ohne daß diese unbedingt intentionales Moment eines Entwicklungskonzeptes und in jedem Anwendungsfall praktikabel gewesen wäre (Bild 13).

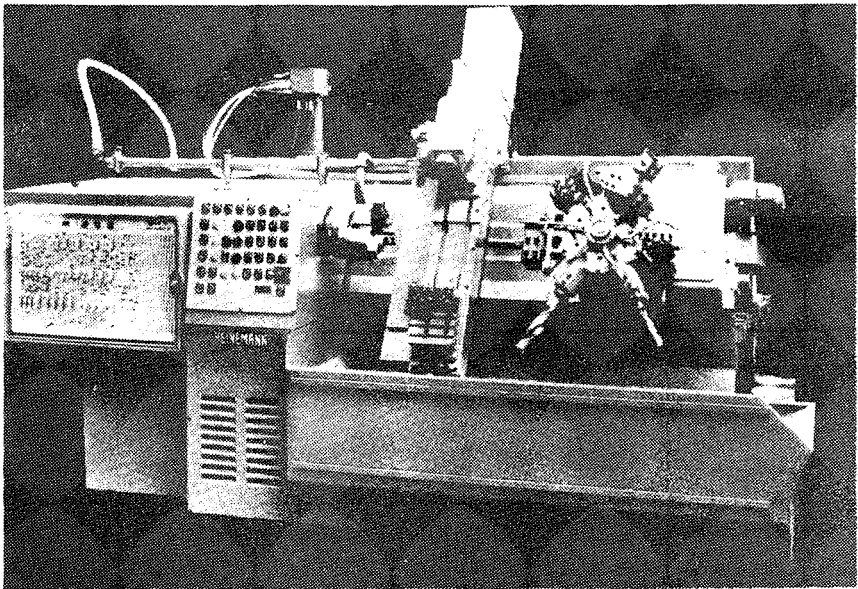


Bild 13: Numerisch gesteuerte Revolverdrehmaschine mit drei Achsen¹⁰
(Quelle: Simon 1971)

10 Handeingabe über einen Kreuzschienenverteiler, der für einen ganzen Arbeitszyklus programmierbar war; zweite Hälfte der 60er Jahre.

Diese Steuerungsentwicklungen wurden von fast allen "namhaften" Werkzeugmaschinenherstellern verfolgt (wt 3/1966, S. 122), Elektrotechnische Unternehmen waren offenkundig seltener vertreten.

So wurden Bohr- und Fräswerke mit solchen Handeingabesteuerungen neben anderen von den Werkzeugmaschinenherstellern Heller, Fritz Werner, Wanderer, Scharmann und Schieß oder Drehmaschinen von den Herstellern Max Müller, Heyligenstädt und Pittler entwickelt und angeboten (WB 12/1964, S. 833 ff.; WB 8/1966, S. 555 ff.; Dormehl 1965; Stromberger 1966, S. 605 f.). Nach Expertenangaben boten aber auch die Elektrotechnischen Unternehmen BBC 1964/65 eine Programmwalzensteuerung und Olivetti 1965 eine Programmsteuerung für Anwendungen im Werkzeug- und Formenbau an.

Da die Informationsverarbeitungskapazität von Steckerfeldsteuerungen durch die Steckfeldgröße begrenzt war, zielte die Entwicklung von kartengesteuerten Maschinen, bei denen gelochte Programmkarten eine große Anzahl von Schalt- und Weginformationen trugen, auf die Überwindung dieser Anwendungsrestriktionen. Diese Programmkarten konnten sowohl in der Werkstatt als auch im Planungsbüro erstellt werden. Ein Beispiel war die Revolverdrehmaschine Pinumat mit einer Streckensteuerung der Pittler Maschinenfabrik (Simon 1971, S. 305, 455).

Als weiterer Typ werkstattorientierter Steuerungen lassen sich sogenannte Positioniersteuerungen mit Handeingabe ansehen, die in ihren verschiedenen Ausführungen allerdings nur schwer von der großen Gruppe der Programmsteuerungen zu unterscheiden sind. Solche Steuerungen fanden sich hauptsächlich an Koordinaten-Bohrmaschinen und eröffneten die Möglichkeit, Koordinatenwerte direkt ohne Zwischenspeicherung einzugeben sowie einem Zähler mit einem digitalen Anzeigegerät (wt 3/1966, S. 122; Simon 1971, S. 31).

Fraglos stieß die direkte Dateneingabe in ihren verschiedenen Formen damals sehr schnell an die technischen Grenzen der Datenspeicher in den Steuerungen. Die Steuerungen erwiesen sich nur bei einer begrenzten Zahl einzugebender Daten als praktikabel und handhabbar, weshalb sie in der Regel nur als Punkt-, teilweise als Streckensteuerungen für zwei, maximal drei Achsen und die Bearbeitung nicht sehr komplizierter Teile ausgelegt waren.

Charakteristisch dafür ist das Beispiel einer Steckerfeldsteuerung an einer Bohr- und Fräsmaschine Anfang der 60er Jahre, bei der bis zu 28 Arbeitsschritte gespeichert werden konnten. In einem anderen Fall konnten an einer Handeingabesteuerung für Drehmaschinen, Eltropilot von Max Müller, bis zu 40 Arbeitsschritte eingegeben werden. Wenn mehr Arbeitsschritte für die Bearbeitung ei-

nes Teils erforderlich waren, mußte das Programm über Lochstreifen eingegeben werden (Simon 1963, S. 208 f.; WB 12/1964, S. 833 ff.).

Nach übereinstimmenden Angaben der interviewten Experten setzten sich daher solche werkstattorientierten Steuerungen nur begrenzt durch, und sie standen in der Bundesrepublik weithin im Schatten des auf eine Zentralisierung der Programmierung hinauslaufenden Hauptpfades der NC-Entwicklung, mit dem sich insgesamt eine größere Leistungsfähigkeit der Steuerungen verband. Gleichwohl können die werkstattorientierten Steuerungen als wichtiger Seitenpfad angesehen werden. Denn sie boten vielen Werkzeugmaschinenherstellern die Möglichkeit, ohne größeren zusätzlichen Aufwand die NC-Technologie für die anwendungsorientierte Weiterentwicklung und Automatisierung ihrer Produkte zu nutzen. Zugleich fanden diese Steuerungen aufgrund ihrer Flexibilität und ihres niedrigen Preises in Einsatzfeldern wie der Einzel- und Kleinserienfertigung Verwendung, für die die damaligen zentral programmierbaren NC-Steuerungen unflexibel und zu teuer waren; denn der Aufwand für die Einrichtung eines Programmierbüros entfiel (Dyke 1970, S. 908; Simon 1971, S. 301 ff.). Aus der Perspektive des damaligen Hauptpfades der NC-Entwicklung in der Bundesrepublik wurden daher solche werkstattorientierten Steuerungen vielfach auch als Zwischenschritt zur Einführung "normaler NC-Maschinen" angesehen, und derartige Steuerungen wurden als Teil stufenweise automatisierbarer Maschinen konzipiert (Schulz 1966, S. 555 ff.).

Einen Hinweis auf die im Vergleich zu den USA relativ große Bedeutung solcher Steuerungen geben quantitative Daten aus einer teilrepräsentativen Untersuchung im Maschinenbau, nach denen in den 60er Jahren immerhin ein knappes Sechstel aller automatisierten Werkzeugmaschinen mit Programmsteuerungen ausgerüstet waren.¹¹ Einen weiteren Hinweis auf die Bedeutung dieser Steuerungstypen gibt ein amerikanischer Messebericht über eine westdeutsche Werkzeugmaschinenmesse 1964, wo als Besonderheit hervorgehoben wird, daß die dort ausgestellten NC-Maschinen von "tapeless NC - dial or plugboard control systems" dominiert wurden (AM, Oktober 1964, S. 93 f.).

Nicht überraschend ist daher, daß werkstattorientierte Steuerungen, folgt man den einschlägigen Messeberichten, von so gut wie von keinem der in den 60er Jahren auf dem europäischen NC-Markt teilweise stark vertretenen US-Herstel-

11 Eigene Berechnung nach Brödner, Hamke 1969, Tafel 5.

lern von NC-Steuerungen angeboten wurden. Lediglich die Positioniersteuerung Tape-O-Matic von Pratt & Whitney ist zu nennen, die ca. Mitte der 60er Jahre zeitweise in der Bundesrepublik abgesetzt wurde. Dieses Low-Cost-System wies zwar, wie schon angeführt (Kap. IV), viele Merkmale einer werkstattorientierten Steuerung auf, war jedoch primär für Lochstreifenbetrieb ausgelegt. Eine Weiterentwicklung dieses Systems, eine Wahl- und Digitalschaltersteuerung, wurde Ende der 60er Jahre in Europa angeboten (WB 10/1969, S. 655 ff.). Cincinnati Milacron bot Ende der 60er Jahre eine speziell für "europäische Belange" ausgelegte Low-Cost-Steuerung mit Handeingabe an (WB 12/1971, S. 880 ff.).

b) Stetige Weiterentwicklung

Diese Situationsbeschreibung gilt weitgehend auch noch für die beginnenden 70er Jahre. Zwar war nach Aussagen vieler Experten Werkstattprogrammierung zu diesem Zeitpunkt im Vergleich zum Ende der 70er Jahre "noch kein Thema" in der einschlägigen Diskussion über die weitere Entwicklung der NC-Technik. Doch läßt das vorliegende Material den Schluß zu, daß werkstattorientierte NC-Steuerungen im Unterschied zu den USA ständig weiterentwickelt wurden. Einen Hinweis darauf gibt ein Bericht über die 11. Europäische Werkzeugmaschinenmesse, in dem von einem breiten Angebot programmgesteuerter Maschinen die Rede ist. Hervorgehoben wird, daß sich die Programme dieser Steuerungen der Schreibweise zentral erstellter Programme anpaßten und ihre Datenverarbeitungskapazitäten weiter ausgeweitet würden, ohne daß jedoch die Flexibilität der Steuerungen verloren gehe. Darüber hinaus wurden offensichtlich in größerem Umfang erstmals auch die Vorteile von in die Steuerungen fest implementierter, wiederkehrender Arbeitszyklen für die Handeingabe genutzt (z.B. WB 10/1969, S. 655 ff.).

Wie in den 60er Jahren zielten solche Steuerungen primär auf ihre technisch problemlose sowie ökonomisch und flexible Anwendbarkeit unter sehr verschiedenen, insgesamt nur schwer ex ante kalkulierbaren Fertigungsbedingungen.

Ein typisches Beispiel für die Weiterentwicklung und Ausweitung dieses NC-Pfades ist die programmgesteuerte Drehmaschine TF des Drehmaschinenherstellers Traub, die 1973 auf den Markt gebracht wurde. Traub beschränkte sich bis dahin auf die Produktion einfacher kurvengesteuerter Drehautomaten vor allem für kleine Metallbearbeitungsbetriebe in der Region Baden-Württemberg. Während die mechanischen Drehautomaten aufgrund ihrer hohen Umrüstzeiten hauptsächlich in der Großserienfertigung Anwendung fanden, zielte die Neuentwicklung aufgrund ihrer wesentlich leichteren Umrüstbarkeit auf die Fertigung

kleinerer Losgrößen. Die Programmsteuerung basierte auf Lochkarten als Datenträger, die in Kombination mit verstellbaren Festanschlägen einen automatischen Bearbeitungsprozeß ermöglichen sollten. Wesentlich ist, daß die Programme auf den Lochkarten mit Hilfe von Lochzangen in der Werkstatt erstellt wie auch durch Überkleben ständig verändert werden konnten. Erleichtert wurde diese Form der Programmierung dabei durch vormarkierte Datenkombinationen, die wiederkehrende Arbeitszyklen markierten (Firmenunterlage).

Getragen wurde dieser Entwicklungspfad allerdings nicht mehr nur von Werkzeugmaschinenherstellern, sondern zunehmend beteiligten sich an der Entwicklung solcher Steuerungen auch größere Elektrotechnische Unternehmen wie Olivetti, BBC oder Siemens. Häufig in Form sogenannter "Low-Cost-NCs" wurde über eine Erweiterung der Speichermöglichkeiten der Umfang der direkt eingebbaren Daten erhöht und damit das potentielle Einsatzfeld dieser Steuerungen noch ein Stück erweitert. Konsequenter als bisher wurden jetzt die sich bietenden Möglichkeiten der Halbleitertechnik genutzt.

Hervorzuheben sind beispielsweise die Siemens-Steuerungen Sinumerik 220 und Sinumerik 52, beide für Drehmaschinen, die für Werkstattprogrammierung ausgelegt waren. Die Sinumerik 220, eine Streckensteuerung für zwei Achsen, die seit 1969 in größeren Stückzahlen hergestellt wurde, basierte auf einer Kombination von Kreuzschienenverteiler für die Schaltinformationen und Dekadenschaltern für die Weginformationen. Wie in einer Herstellerbeschreibung hervorgehoben wird, war die Programmierung dieser Steuerung einfach gewesen und bedurfte keiner besonderen Hilfsmittel (Bornhorst, Rössel 1970). Die Sinumerik 52 stellte 1973 das Nachfolgemodell dar, mit dem erstmals Halbleiterspeicher anstelle der früheren elektromechanischen Speicher für Handeingabe genutzt wurden. Folgt man den Produktbeschreibungen des Herstellers, so erforderte diese Steuerung bei relativ komplexen Bearbeitungsanforderungen nur einen geringen Programmieraufwand in der Werkstatt (Rössel 1973).

Daneben gab es vielfältige Sonderentwicklungen von Werkzeugmaschinenbetrieben oder kleinen Elektronikfirmen für ausgesprochene Marktnischen mit speziellen Bearbeitungsverfahren, die sehr konsequent für einen möglichst einfachen Handbetrieb ausgelegt waren. Als typisch gelten beispielsweise die Handsteuerungen des kleinen Steuerungsherstellers R & D (Rohde & Delesen), die vor allem für Schwerdrehmaschinen und Schleifmaschinen ausgelegt waren. Diese Steuerungen werden seit dem Ende der 60er Jahre angeboten, und es gibt weder aus dem Inland noch aus dem Ausland nennenswerte Konkurrenzprodukte. Für solche Spezialsteuerungen existiert bis heute ein relativ stabiler Markt (Dunkhorst 1989); (Bild 14).

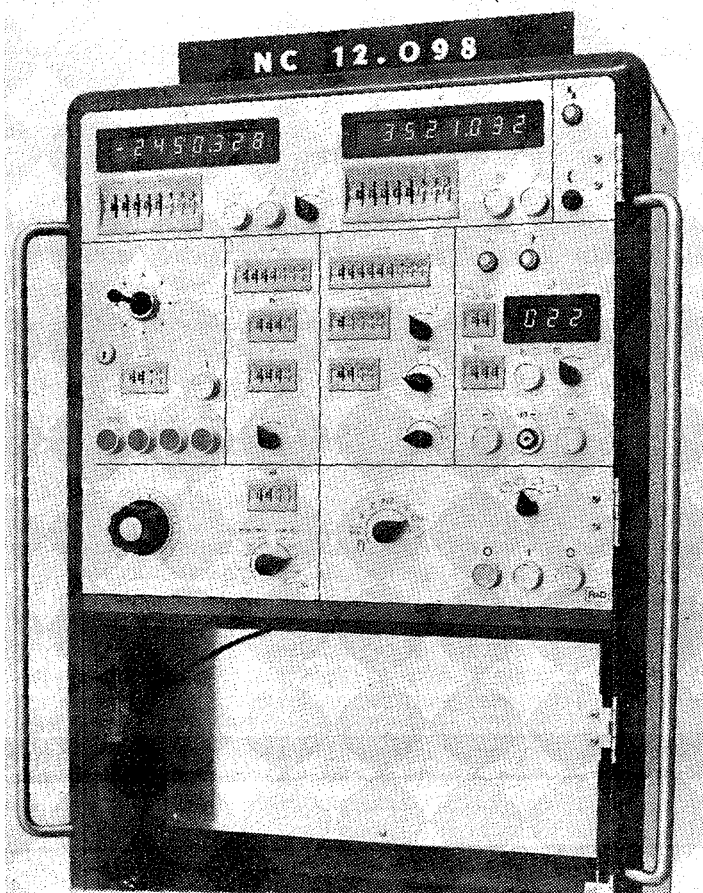


Bild 14: Ausschließlich für Handeingabe ausgelegte Hardware-NC-Steuerung, erstmals 1971 vorgestellt
(Werkfoto R & D)

Dies galt freilich nicht für das weite Feld der werkstattorientiert ausgelegten Programmsteuerungen. Sie konnten bestenfalls bis in die zweite Hälfte der 70er Jahre als Alternative zu den sonst hauptsächlich gebräuchlichen Standardsteuerungen gelten (VDI-Z 1/1976). Denn die dann einsetzende systematische Nutzung der CNC-Technologie für solche werkstattorientierten Steuerungskonzepte eröffnete aufgrund ihrer beträchtlich höheren

Leistungsfähigkeit weit bessere Möglichkeiten für Werkstattprogrammierung und Handeingabe. Die, wie skizziert, nur begrenzt leistungsfähigen Programmsteuerungen erfuhren daher einen schnellen und nachhaltigen Bedeutungsverlust.

3. Innovationssprung und zunehmende Bedeutung werkstatorientierter Steuerungen

Die Entwicklung und die Nutzung frei programmierbarer CNC-Steuerungen verlief in der Bundesrepublik wie generell in Europa zunächst ähnlich zögernd wie in den USA. Zwar lassen sich erste Experimente und Prototypen schon auf Anfang der 70er Jahre datieren, doch setzte eine breitere praktische Nutzung dieser Technik erst einige Jahre später ein. Dann allerdings, etwa ab Mitte der 70er Jahre, kann im Unterschied zu den USA von einem Entwicklungssprung dieser Technik in der Bundesrepublik gesprochen werden, wobei der werkstatorientierte Entwicklungspfad, gleichfalls in deutlichem Unterschied zur US-Entwicklung, zunehmendes Gewicht erlangte.

Die ersten in Europa entwickelten CNC-Steuerungen wurden 1970 von Philips, AEG und dem schwedischen Elektronik- und Rüstungsunternehmen Kongsberg auf einer Messe vorgestellt (WB 12/1970, S. 979 ff.; WB 12/1971, S. 880 ff.), weitere große Steuerungshersteller aus der Bundesrepublik, wie beispielsweise Siemens, zogen jedoch erst einige Jahre später nach und betrachteten CNC-Steuerungen zunächst lediglich als spezielle Ergänzung zur herkömmlichen NC-Technik (Gehrels, Waibel 1973). Vorliegenden Zahlen zufolge waren 1974 in der Bundesrepublik erst maximal ein Prozent aller NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen mit frei programmierbaren Steuerungen ausgestattet. Dabei handelte es sich ausschließlich um Bohr- und Fräsmaschinen (Clausnitzer 1974, S. 15).

Von Siemens wurde erst 1973 eine CNC-Steuerung - allerdings nur für spezielle Anwendungsfälle - auf den Markt gebracht. Es fanden sich in dieser Zeit auf dem deutschen Steuerungsmarkt in Lizenz gebaute CNC-Steuerungen aus den USA wie eine von Masing/Bosch übernommene Bendix-Steuerung oder einige wenige mit Minicomputern ausgerüstete CNC-Steuerungen der allerersten Generation (Duelen 1973, S. 12).

a) Handeingabesteuerungen dominieren

Obgleich noch Anfang der 80er Jahre unter dem Eindruck erster japanischer Exporterfolge mit CNC-Werkzeugmaschinen und des damaligen Konjunktureinbruchs in der Investitionsgüterindustrie vielfach die Innovationsschwäche des bundesdeutschen Werkzeugmaschinenbaus beklagt wurde, zeigt sich jedoch im nachhinein, daß grundlegende Innovationsschritte eingeleitet waren (z.B. Schulz 1981; Rossnagel 1983). Denn spätestens ab der zweiten Hälfte der 70er Jahre setzte in der Bundesrepublik ausschließlich auf der Basis frei programmierbarer CNC-Steuerungen ein Entwicklungsschub in Richtung einer deutlich erhöhten Einsatzflexibilität der NC-Technik ein. Diese Entwicklung umfaßte zum einen die technische Leistungs- und Anwendungsbreite - zumeist wurden die Steuerungen als Bahnsteuerungen konzipiert - sowie ein deutlich verbessertes Preis-Leistungs-Verhältnis. Zum zweiten wurde generell die organisatorische Flexibilität der Steuerungen gesteigert, indem auf breiter Front die Möglichkeiten der Datenhandeingabe ausgeweitet wurden. Spätestens in dieser Phase werden die Differenzen zur US-Entwicklung unübersehbar; Handeingabe wurde mit diesem Entwicklungssprung - so formulierten es übereinstimmend viele Experten - eine deutsche "Erfindung".

Diese Entwicklung korrelierte mit einer Verschiebung der bisherigen Haupteinsatzbereiche und Einsatzanforderungen der neuen Technik sowie veränderten Entwicklerstrategien: Im bisherigen Haupteinsatzfeld von NC-Maschinen, nämlich große und größere Betriebe der Metallindustrie mit einer in Grenzen standardisierten Fertigung (Pirker u.a. 1970, S. 167 ff.), waren Sättigungstendenzen unübersehbar, und die erste Hälfte der 70er Jahre war, ähnlich wie in den USA, in der Bundesrepublik von einem deutlichen Produktionsrückgang von Werkzeugmaschinen gekennzeichnet; insbesondere in den Jahren 1972/73 kam es zu einem massiven Produktionseinbruch (Tab. 1). Eine weitere Ausweitung des NC-Einsatzes war offensichtlich aus der Sicht vieler Werkzeugmaschinenhersteller nur möglich, wenn die Steuerungen noch weiter als bisher verbilligt und für die Einsatzbedingungen vor allem in mittleren und kleineren Betrieben weiterentwickelt würden. Indes ist, als komplementäre Bedingung dazu, davon auszugehen, daß das Interesse am NC-Einsatz in der Einzel- bis Kleinserienfertigung allmählich wuchs, da diese Industriebereiche weltmarktbedingt unter einen zunehmenden Rationalisierungsdruck gerieten und flexible Formen der Automatisierung erforderlich wurden.

In jedem Fall aber wurde eine Steigerung der organisatorischen Flexibilität der Steuerungen und ein Abbau des zum Einsatz von NC-Maschinen notwendigen organisatorischen Aufwandes in Form der Programmierbüros zu einer der zentralen Voraussetzungen ihrer weiteren Verbreitung. Den Ergebnissen einer damals durchgeführten Studie zufolge, hatte noch Mitte der 70er Jahre trotz hoher Rationalisierungszwänge eine große Zahl potentieller NC-Anwender aufgrund des für diese Technik erforderlichen organisatorischen Aufwandes von der Beschaffung von NC-Maschinen Abstand genommen (Kunerth u.a. 1976).

Als Reaktion auf diese Situation suchten vor allem Werkzeugmaschinenbetriebe, durch eine Weiterentwicklung der Maschinen ihre angestammten Absatzfelder zu sichern und sich neue zu erschließen. Sie drängten aus diesem Grund die Steuerungshersteller aus der Elektrotechnischen Industrie zur Entwicklung flexiblerer Steuerungen. Oder aber sie versuchten vermehrt, Steuerungen selbst zu entwickeln. Dies erwies sich in vielen Fällen als innovativer und aussichtsreicher, weil die Elektrotechnischen Unternehmen aufgrund ihrer entwicklungsstrategisch engen Bindung an den bisherigen Hauptpfad der Entwicklung und ihrer relativ großen Distanz zu den Anwendern von NC-Maschinen nur eine begrenzte Innovationsbereitschaft zeigten (z.B. Weck, Verhaag 1976). Freilich kam ihnen die damals rasante Entwicklung der Mikroelektronik und damit der Steuerungshardware entgegen. Noch wichtiger war aber, daß es den Werkzeugmaschinenherstellern gelang, das erforderliche Know-how und die notwendigen Entwicklungsressourcen entweder intern oder über externe Kooperationsbezüge aufzubauen. Von besonderer Bedeutung dafür war eine Intensivierung der vertikalen Herstellerkooperation zwischen den Werkzeugmaschinenbauern und Elektrotechnischen Unternehmen, die vermehrt Steuerungen ausschließlich nach Spezifikationen und unter Namen des Werkzeugmaschinenbaus bauten und lieferten. Wie noch genauer auszuführen ist (Kap. VI, VII), liegt darin eine der entscheidenden institutionellen Ursachen für die Differenzen zwischen der amerikanischen und bundesdeutschen Entwicklung von Fertigungstechnik.

Ab Mitte der 70er Jahre folgte die NC-Entwicklung in der Bundesrepublik daher immer mehr dem werkstatorientierten Entwicklungspfad. Initiiert vor allem von Werkzeugmaschinenherstellern wurden die Möglichkeiten der Werkstattprogrammierung systematisch weiterentwickelt oder aber im Rahmen neuer Werkzeugmaschinenentwürfe völlig neu und unter Umständen auch erstmals mit dem expliziten Ziel von Werkstattprogrammierung.

runge verfolgt. Die Auslegung dieser Steuerungen ging, um ihre möglichst breite und problemlose Einsetzbarkeit zu sichern, vom Prinzip der Handeingabe der Programmdaten aus. Als Merkmale der neuen Steuerungstypen kristallisierten sich sehr schnell die auch heute noch gebräuchlichen, inzwischen freilich weiterentwickelten Programmierhilfsmittel wie Programmiersprachen im Dialog, Verfahren der Bedien- und Programmierführung, umfangreiche Unterprogrammtechniken und Zyklenprogrammierung sowie verschiedenen Formen von Simulationsmöglichkeiten der Bearbeitungsprozesse auf Bildschirmen an den Steuerungen heraus.

Wegweisend für diesen Entwicklungssprung waren die NEF-Steuerung und Drehmaschinenkonzeption des Werkzeugmaschinenunternehmens Gildemeister 1975/76. Mit dem NEF-Konzept wurde Werkstattprogrammierung nach Ansicht vieler Experten im Vergleich zu ihrer früheren, letztlich doch nur nachgeordneten Existenz "hoffähig" (Bild 15).



Bild 15: NEF-Handeingabesteuerung 1975/76
(Werkfoto Gildemeister)

Obgleich die direkte Programmierung an dieser Steuerung im Vergleich zu späteren Handeingabesteuerungen nicht sehr einfach war - notwendig war beispielsweise ein zusätzlicher Taschenrechner zur Berechnung bestimmter Funktionen -, erwies sich dieses Drehmaschinenkonzept als überaus erfolgreich, und im Verlauf von etwa acht Jahren wurden nahezu 3.000 Drehmaschinen dieses Typs verkauft (NC-Fertigung 2/1984, S. 82).

Es handelte sich dabei nicht nur um eine bloße Steuerungsentwicklung, sondern die Steuerung war Hauptelement eines einfachen und nicht sehr teuren, jedoch viele Anwendungsfälle abdeckenden Gesamtkonzepts einer universellen und billigen Leit- und Zugspindeldrehbank.¹² Damit wurde der Einsatz von NC-Maschinen auch in Kleinstbetrieben ohne jeden Vorbereitungs- und Programmieraufwand möglich. Auf Initiative von Gildemeister wurde diese Steuerung vom japanischen Elektronik- und NC-Hersteller Fanuc entwickelt. Dieses System war für die Bearbeitung einfacher Werkstücke ausgelegt. Die Programmierung an der Maschine konnte entweder ein komplettes Teileprogramm umfassen oder aber sie erfolgte satzweise bei der Bearbeitung des ersten Werkstücks eines Loses. Die Steuerung war gekennzeichnet durch eine einzeilige alphanumerische Anzeige für einzelne Sätze des NC-Programms, durch ein Tastenfeld zur Eingabe der NC-Sätze und eine begrenzte Anzahl von Unterprogrammen mit wiederkehrenden Arbeitszyklen wie Gewindeschneiden.

Noch in den 70er Jahren zogen andere Werkzeugmaschinenhersteller, aber auch einige Steuerungsentwickler, mit ähnlichen werkstattprogrammierbaren Steuerungstypen nach, so daß spätestens Ende der 70er Jahre für die Hauptverfahren der spanenden Bearbeitung, Drehen und Fräsen, leistungsfähige werkstattprogrammierbare CNC-Steuerungen zur Verfügung standen. Für die Fräsbearbeitung mit kleineren und relativ billigen Universalfräsmaschinen brachte 1976/77 der Meßgerätehersteller Haidenhain in enger Kooperation mit dem Fräsmaschinenhersteller Maho eine ausschließlich für Werkstattprogrammierung nutzbare Steuerung auf den Markt. Es handelte sich dabei um eine sogenannte Tip-NC-Steuerung (TNC) für drei Maschinenachsen, die anfangs keinerlei Möglichkeit für die Verwendung eines steuerungsexternen Datenträgers wie Lochband oder Magnetband bot. Kurze Zeit darauf folgte mit ähnlichen Steuerungskonzepten der Maschinenbauer Deckel in Zusammenarbeit mit dem Elektrotechnischen Unternehmen Grundig (z.B. Geiger u.a. 1978); (Bild 16).

12 Nach Ansicht eines maßgeblich an der Entwicklung dieses Maschinentyps beteiligten Experten wurde ein solches einfaches Gesamtkonzept einer CNC-Drehmaschine seither nicht mehr aufgegriffen. Während die NEF-Steuerung nur 5.000 DM und die gesamte Maschine weniger als 100.000 DM gekostet haben, seien die späteren werkstattprogrammierbaren CNC-Maschinen insgesamt sehr viel aufwendiger und komplexer gewesen.

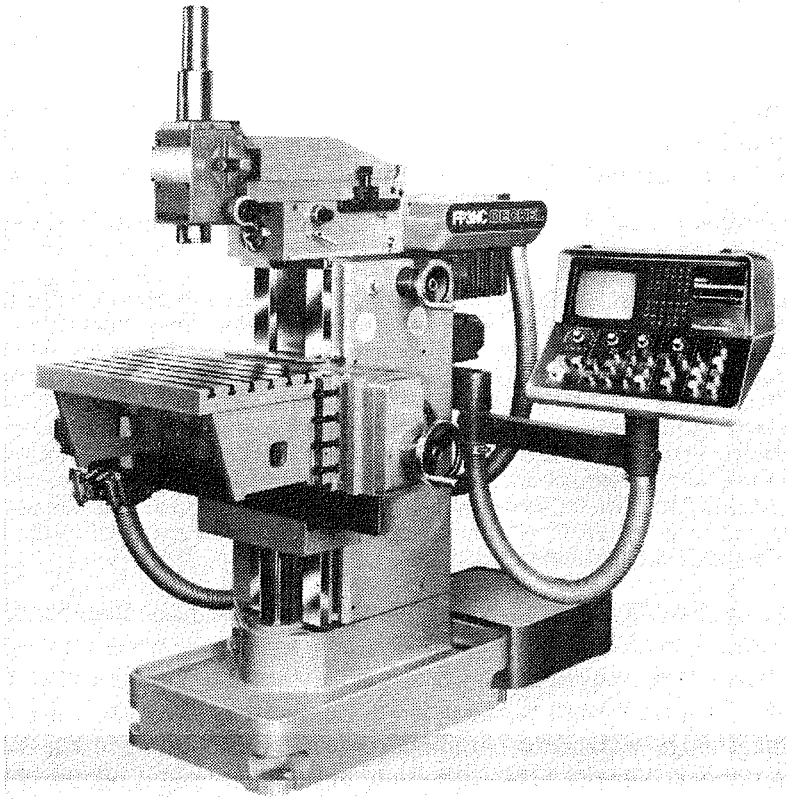


Bild 16: Universalfräsmaschine mit Handeingabesteuerung; erste Hälfte der 80er Jahre
(Werkfoto Deckel)

Für die Drehbearbeitung sind neben der Weiterentwicklung des NEF-Konzeptes die Steuerungen des Drehmaschinenherstellers Boehring, der mit Philips zusammenarbeitete, und werkstattorientierte Steuerungen vor allem von Traub zu nennen.

Anknüpfend an seine Programmsteuerungen von Anfang der 70er Jahre nutzte der Drehmaschinenhersteller Traub die Möglichkeiten der Mikroelektronik sehr weitreichend für die Entwicklung werkstattprogrammierbarer Steuerungen, die in Kooperation mit japanischen Elektronikherstellern, zunächst Oki, später Mitsubishi, und einem ingenieurwissenschaftlichen Institut 1977 begann. Entwickelt

wurde eine 2-Achsen-Bahnsteuerung, TX-7 und später TX-8, welche sich durch die Simulierbarkeit der an der Maschine programmierten Bearbeitungsoperationen auf einem Steuerungsbildschirm auszeichnete. Im Vergleich zur NEF-Steuerung von Gildemeister wurde durch diese Simulationsmöglichkeit, einer umfangreichen Unterprogrammtechnik und einen sog. Geometrieprozessor zur Berechnung komplizierter Konturen Werkstattprogrammierung erheblich vereinfacht (Hammer 1979). Wie von Experten hervorgehoben wurde, wurden mit den Traub-Steuerungen Forderungen "der Praxis" nach einer vereinfachten Werkstattprogrammierbarkeit relativ komplexer Drehprozesse in besonderer Weise erfüllt.¹³

Diese hauptsächlich von den Werkzeugmaschinenherstellern forcierte Entwicklung war Anlaß, daß Ende der 70er/Anfang der 80er Jahre in der Bundesrepublik eine relativ intensive Debatte um die Vor- und Nachteile von Werkstattprogrammierung und die Möglichkeiten der Rücknahme eingefahrener arbeitsteiliger Strukturen in Metallbetrieben begann. Beteiligt daran sind bis heute alle direkt oder indirekt mit NC-Entwicklung und NC-Einsatz befaßten Akteure von Ingenieurwissenschaftlern über Anwender bis hin zu Gewerkschaften.¹⁴ Diese Debatte wirkte fraglos beschleunigend auf die Weiterentwicklung werkstattorientierter Steuerungen zurück. Dabei traten vermutlich erstmals in der westdeutschen NC-Geschichte einflußreiche "Change Agents" auf, die an der Weiterentwicklung werkstattorientierter Steuerungen massives Interesse hatten: Ende der 70er Jahre wurde die Gildemeister-Entwicklung werkstattorientierter Steuerungen nachhaltig durch einen Großauftrag des Maschinenbaukonzerns MAN über 60 werkstattprogrammierbare Drehmaschinen des Typs MD5S gestützt. Durch den Einsatz solcher Maschinen sollte in diesem Konzern auf breiter Front die zentrale Programmierung zugunsten von Werkstattprogrammierung rückgängig gemacht und "Fertigungsinseln" mit nur geringer Arbeitsteilung zwischen Planung und Ausführung eingeführt werden.¹⁵ Nicht zufällig wurde darüber hinaus in den 80er Jahren die

13 Aufgrund der engen Kooperation von zwei wichtigen Werkzeugmaschinenherstellern (Gildemeister und Traub) mit japanischen Steuerungsherstellern meinten einige der interviewten Experten, daß die überaus erfolgreiche japanische Entwicklung von Handeingabesteuerungen letztlich auf deutsche Anstöße und Konzepte zurückführen sei.

14 Sofern eine solche Debatte in den USA überhaupt geführt wird, so begann sie frühestens in der zweiten Hälfte der 80er Jahre (Richardson et al. 1990).

15 Diese Entscheidung von MAN wurde hauptsächlich vom damaligen Vorstandsvorsitzenden H.H. Moll initiiert, einem langjährigen Verfechter der Werkstattprogrammierung (Moll 1979; 1984).

Weiterentwicklung werkstatorientierter Steuerungen Gegenstand eines größeren staatlich geförderten Entwicklungsprojektes mit einer größeren Zahl von Entwicklern, Herstellern und Anwendern. Der Einfluß dieses Projektes auf die Weiterentwicklung werkstatorientierter Steuerungen kann trotz der verschiedentlich als sehr begrenzt angesehenen staatlichen Fördermittel aufgrund der von diesem Projekt ausgehenden Informations- und Diskussionsanstöße als relativ hoch eingeschätzt werden.

Es handelt sich dabei um das über die einschlägige Fachöffentlichkeit hinaus bekannt gewordene WOP-Projekt des Projektträgers Fertigungstechnik und des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (WOP: Werkstattorientierte Programmierverfahren), an dem ingenieurwissenschaftliche Institute, Elektrotechnische Unternehmen, Software-Häuser, Hersteller aus dem Werkzeugmaschinenbau und Anwender aus dem Maschinenbau - insgesamt 25 Partner - teilnahmen. Ziel des Projektes war, für möglichst alle Bearbeitungsverfahren eine einheitliche und im Werkstattbetrieb problemlos nutzbare Programmiersprache zu entwickeln (Brödner 1989; Liese 1989).

Diese Gesamtentwicklung führte zu einer schnell steigenden Produktion von NC-Maschinen in der Bundesrepublik insgesamt; allein im Zeitraum von 1980 bis 1983 fand mehr als eine Verdopplung der Produktionszahlen statt, und im Verlauf der dann folgenden Jahre zeigte sich ein weiterer kontinuierlicher Anstieg der Produktion von NC-Maschinen. Im gleichen Zeitraum stagnierte hingegen in den USA die NC-Produktion (Tab. 1). Darüber hinaus ist von einem ständig steigenden Marktanteil der Hersteller werkstatorientierter Steuerungssysteme auszugehen, der, ohne daß hierzu genauere Zahlen vorliegen, zu Lasten der Hersteller des bisherigen Hauptpfades der NC-Technik ging. So wiesen diese Hersteller in der zweiten Hälfte der 80er Jahre schätzungsweise einen Marktanteil von mehr als 30 % mit steigender Tendenz auf (Mulkens 1987; NC-Fertigung, September 1989).¹⁶

b) Anpassung der Standardsteuerungen

Diesem Entwicklungstrend konnten sich letztlich auch die Hersteller von Steuerungen des bisherigen Hauptpfades, nämlich hauptsächlich Elektro-

¹⁶ Nicht zufällig ist daher auch in der Bundesrepublik in den letzten Jahren eine ständig wachsende Verbreitung von tatsächlich praktizierter Werkstattprogrammierung bei NC-Anwendern zu beobachten (Nuber, Schultz-Wild 1990).

technische Unternehmen, kaum entziehen. Von dieser Herstellergruppe wurden - gleichfalls anknüpfend an frühere Entwicklungsphasen - etwas zeitversetzt ebenfalls ausgesprochen werkstattorientierte Systeme entwickelt, die nach Ansicht zumindest einiger Experten jedoch nicht allen Anforderungen an werkstattprogrammierbare Steuerungen entsprachen.

Zu nennen ist beispielsweise die 1977 von Siemens vorgestellte, besonders für Handeingabe ausgelegte Steuerung "Sinumerik-Sprint", die den vorliegenden Informationen zufolge in enger Zusammenarbeit mit dem Werkzeugmaschinenbauer Index entwickelt wurde (VDI-Z 119/1977, S. 1013 ff.; Walker 1978), oder die Drehmaschinensteuerung Alpha und das Programmiergerät PEG von Bosch, die explizit für die Programmierung "im Meisterbüro" ausgelegt wurden.

Weiterhin wurden zwar eher schrittweise und allmählich, doch letztlich sehr nachhaltig auch die Standardsteuerungen des bisherigen Hauptpfads der NC-Entwicklung den gewandelten Erfordernissen angepaßt. Typisch ist die Weiterentwicklung der Standardsteuerungen großer Steuerungshersteller wie Siemens. Zunächst richteten sich die Entwicklungsanstrengungen, etwa mit den Systemen 5, 7 und 8, auf die systematische Nutzung der Mikroelektronik zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Komplexität der Steuerungen; so war das System 8 eine Bahnsteuerung für bis zu zehn Maschinenachsen (Schiffelmann 1981). Darauf aufbauend wurden solche Steuerungen, etwa in der ersten Hälfte der 80er Jahre beispielsweise die Systeme 6 und 3 von Siemens, mit umfangreichen Programmierhilfen zur Datenhandeingabe ausgestattet.

Diese Entwicklungstendenzen setzen sich bis in die Gegenwart hinein fort. Ohne nach wie vor vorhandene und für den praktischen Betrieb unter Umständen gravierende Differenzen in der Werkstattprogrammierbarkeit zwischen verschiedenen Steuerungstypen zu übersehen,¹⁷ kann von einer fortschreitenden Annäherung der bundesrepublikanischen Entwicklungspfade der NC-Technik gesprochen werden. Typisch für diesen Annäherungsprozeß sind die Steuerungen der Siemens-Baureihe 800 oder die Sy-

17 Abgestellt wird damit auf die Diskussion über "facharbeitergerechte" NC-Steuerungen (z.B. Blum 1987; Weber 1988; Rose 1990), derzufolge die konkrete Auslegung von Steuerungen erhebliche Konsequenzen für die Sicherung von Facharbeiterqualifikationen habe. Ohne diesen Ansatz im Grundsatz zu bezweifeln, ist bei einer solchen Bewertung freilich zu sehen, daß gerade eine ganze Reihe besonders einfacher werkstattprogrammierbarer Steuerungen entwickelt wurde, um fehlende Facharbeiterqualifikationen, etwa in Kleinstbetrieben, zu kompensieren. Zur Kritik der Diskussion um facharbeitergerechte NC-Steuerungen vgl. z.B. Nullmeier (1987).

steme der Steuerungsbaureihe CC von Bosch (Kief 1988). Generelles Merkmal nahezu aller dieser neueren, teilweise überaus komplexen CNC-Steuerungen ist, wie vergleichende Übersichten zeigen (z.B. Hoffmann, Martin 1990), ihre ständige verbesserte Werkstattprogrammierbarkeit.

Soweit zu beurteilen, spielen in dieser Entwicklung ausländische Steuerungen auf dem westdeutschen Technikmarkt eine vergleichsweise nachgeordnete Rolle. Dies gilt sowohl für Produkte aus den USA als auch für Steuerungen aus dem westeuropäischen Ausland, die in den 80er Jahren in der Bundesrepublik kaum nennenswerte Marktanteile aufwiesen.¹⁸ Ein Indiz für die geringe Bedeutung amerikanischer Steuerungs- und Werkzeugmaschinenhersteller auf dem westeuropäischen Markt ist beispielsweise, daß auf der Europäischen Werkzeugmaschinenmesse 1989, von einer Ausnahme abgesehen, keiner dieser Hersteller vertreten war. Erst neuerdings versucht General Electric, jetzt in enger Kooperation mit dem japanischen Steuerungshersteller Fanuc die skizzierte Entwicklung in Richtung werkstattprogrammierbarer Steuerungen nachzuholen und solche Steuerungen auf dem europäischen Markt anzubieten.

Resümiert man die Gesamtentwicklung der NC-Technik in den USA und der Bundesrepublik im Zeitraum von den 40er bis zu den 80er Jahren, so fällt besonders für die letzten Phasen des betrachteten Zeitraums eine zunehmende Konvergenz der verschiedenen Entwicklungspfade auf. Gemeinsamer Fluchtpunkt aller Entwicklungspfade ist eine ständig verbesserte Werkstattprogrammierbarkeit der Steuerungen. Damit gewinnen die Entwicklungsziele und -kriterien des werkstattorientierten Seitenpfades für die NC-Entwicklung insgesamt an Gewicht. Aus bundesrepublikanischer Perspektive konvergieren der frühere Hauptpfad und der bisherige Seitenpfad. Darüber hinaus ist unübersehbar, daß sich der amerikanische Hauptpfad schrittweise der bundesdeutschen Entwicklung annäht.¹⁹

18 Dieses gilt auch für japanische Steuerungen, die auf dem Weltmarkt insgesamt eine sehr dominante Rolle spielen (vgl. Mulkens 1987).

19 Ohne Frage kann damit bei der NC-Entwicklung von einer Angleichung nationalspezifischer Besonderheiten gesprochen werden. Zu bezweifeln ist jedoch, ob sich damit eine generelle Konvergenz fertigungstechnischer Entwicklung, wie verschiedentlich vermutet (Rauner, Ruth 1988), durchsetzt. Vielmehr ist anzunehmen, daß sich entlang neuer technischer Besonderheiten, geänderter Anwendungsfelder und institutionalisierter Entwicklungsbedingungen neue Grenzziehungen eröffnen (Kap. VIII, 5.).

Unübersehbar und klärungsbedürftig bleiben jedoch die großen Entwicklungsdivergenzen der NC-Technik zwischen beiden Ländern und der damit zusammenhängende Tatbestand, daß die amerikanische NC-Technik zunehmend an Bedeutung verlor. Wie dargestellt, zielte der Hauptpfad der US-Entwicklung zunächst auf eine weitreichende Automatisierung von Bearbeitungsprozessen, während die bundesdeutsche Entwicklung über lange Jahre hinweg einem Pfad nur begrenzter Automatisierung folgte. Ein wichtiger Unterschied besteht vor allem darin, daß der werkstatorientierte Pfad in den USA so gut wie nicht verfolgt wurde, in der Bundesrepublik hingegen von Beginn der Entwicklung an eine relativ große Bedeutung hatte, bis er schließlich Basis des nachhaltigen Innovationschubs in den 70er Jahren und zu Beginn der 80er Jahre wurde.

Diese Divergenzen der NC-Entwicklung zwischen den USA und der Bundesrepublik Deutschland lassen sich zunächst auf einen je nationalspezifischen Abstimmungsprozeß zwischen der Verwissenschaftlichung fertigungstechnischer Entwicklung einerseits und den verschiedenartigen und kontingenten Anforderungen der industriellen Anwendung andererseits zurückführen: Die Entwicklungsanstrengungen in den USA richteten sich vor allem in der Phase der Basisinnovation, aber auch in den späteren Phasen der Innovation und Diffusion auf eine möglichst maximale Nutzung der Potentiale von Informatik und Computertechnologie mit dem Ziel, einen hohen Automatisierungsgrad und eine umfassende Beherrschbarkeit von Bearbeitungsprozessen zu realisieren. Die Phase der Basisinnovation war einerseits durch eine generell hohe Distanz zur industriellen Praxis von Technikanwendung gekennzeichnet. Andererseits setzte sich ein sehr spezialisierter Bezug zur industriellen Realität durch, der das Entwicklungsprojekt einer weitreichend automatisierten Werkzeugmaschine als aussichtsreich erscheinen ließ, nämlich die ex ante relativ genau kalkulierbaren und fixierten industriellen Prozeßbedingungen der militärischen Luft- und Raumfahrtindustrie. Unter diesen Bedingungen ließ sich tatsächlich ein hoher Automatisierungsgrad realisieren, freilich mit dem Folgeeffekt, daß sich die amerikanische NC-Technik für weite Bereiche ziviler Anwendungsfelder als zu komplex, zu spezialisiert und zu teuer erwies. Der "down-market"-Prozeß der 60er und 70er Jahre konnte diese Restriktionen für eine breite zivile Nutzung dieser Technik offensichtlich nicht grundlegend überwinden, so daß die amerikanische NC-Technik unter zunehmenden Konkurrenzdruck von deutschen wie vor allem japanischen NC-Herstellern geriet.

Die NC-Entwicklung in der Bundesrepublik hingegen verlief von Anbeginn an sehr viel anwendungsnäher und setzte hierfür die verfügbaren wissenschaftlichen und technologischen Potentiale gezielt ein. Stoffliche Unwägbarkeiten der Bearbeitung, marktökonomisch bedingte zeitliche und sachliche Varianzen von Produktionsprozessen und strukturelle Unterschiede von Anwenderbetrieben waren die Schranken der NC-Entwicklung. Sie stand daher von Anbeginn an unter dem Erfordernis einer Anpassungsfähigkeit an diese kontingenten Bedingungen, was durch eine spezifische und selektive Nutzung der jeweils vorhandenen wissenschaftlichen und technologischen Potentiale der Informatik und Computertechnologie und einer im Vergleich sehr viel anwendungsbezogeneren Verwissenschaftlichung der neuen Steuerungstechnik erreicht wurde.

VI. Amerikanische Innovationsmuster

Die in den beiden Ländern verschiedenen Entwicklungspfade der NC-Technik lassen sich auf eine ganze Reihe sozioökonomischer Bestimmungsfaktoren zurückführen. Ihrem Einfluß auf die gesamte fertigungstechnische Entwicklung der Nachkriegszeit, deren wichtigster Teil eben die NC-Entwicklung war, soll im folgenden genauer nachgegangen werden. Aufgegriffen wird dazu die eingangs (Kap. II, 5.) entwickelte Begrifflichkeit, nach der das Zusammenspiel dieser in den USA und der Bundesrepublik jeweils verschiedenen gesellschaftlichen Faktoren als national-spezifische Innovationsmuster fertigungstechnischer Entwicklung gefaßt werden kann.

In den Vereinigten Staaten wurden fertigungstechnische Innovationen in der Nachkriegszeit besonders von wissenschaftlichen und militärischen Interessen und den damit verschränkten besonderen Anwendungsproblemen der Luft- und Raumfahrtindustrie geprägt. Diese Einflußfaktoren waren nicht nur konstitutiv für den durch hohe Komplexität und Automatisierung gekennzeichneten Entwicklungspfad der NC-Technik, sondern sie beeinflussten den Verlauf fertigungstechnischer Innovationen insgesamt beträchtlich. Demgegenüber gingen - anders als in Deutschland - in der Nachkriegszeit vom Werkzeugmaschinenbau und den großen fertigungstechnischen Anwenderbetrieben aus den Industrien der Massenfertigung nur sehr wenige oder keine Impulse für fertigungstechnische Innovationen aus. Vorherrschend waren in diesen Bereichen inkrementelle Verbesserungen der im Prinzip seit langem existierenden Maschinen und Anlagen.

Mithin lassen sich in den USA zwei Innovationsmuster fertigungstechnischer Entwicklung unterscheiden, deren Momente sich überschneiden und wechselseitig bedingen: Es handelt sich einmal um ein als wissenschaftlich-militärisch zu begreifendes Innovationsmuster, das sich in der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg etablierte und in dessen Rahmen die NC-Technik und später weitere rechnergestützte Fertigungstechniken entwickelt wurden. Davon läßt sich zum anderen ein als zivil zu charakterisierendes Innovationsmuster unterscheiden, das mit seinen Grundstrukturen unmit-

telbar mit dem amerikanischen Modell der Massenproduktion verwoben ist und das vornehmlich auf die Entwicklung und Weiterentwicklung konventioneller Maschinen und Anlagen zugeschnitten ist.

1. Ziviles Innovationsmuster

1.1 Das amerikanische Modell der Massenproduktion

Das zivile Innovationsmuster ist Element der bis in die 70er Jahre hinein stabilen historischen Phase industriell-kapitalistischer Entwicklung, die in der neueren sozialwissenschaftlichen Diskussion als "Fordismus" bezeichnet wird. Die generellen, freilich nationalspezifisch ungleichzeitig und auf verschiedene Weise sich durchsetzenden Merkmale des Fordismus sind: die Dominanz großbetrieblich organisierter Massenproduktion, wachsende, stabile und für die Betriebe kalkulierbare Absatzmärkte sowie eine kontinuierliche Versorgung mit arbeitsbereiten und motivierten Arbeitskräften. Abgesichert wird die Funktionsfähigkeit dieser ökonomischen Zusammenhänge durch ein System der Makroregulation, dessen zentrales Element ein zunehmender Staatsinterventionismus zur Kompensation der Krisenanfälligkeit des Wirtschaftssystems ist (z.B. Lutz 1984; Piore, Sabel 1985; Scherrer 1992).

In den USA begann sich das Modell der Massenproduktion schon in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts durchzusetzen, und es erwies sich bis zum Anfang der 70er Jahre als besonders ausgeprägt und stabil. Zwar hatten amerikanische Unternehmen schon zu Beginn des Jahrhunderts weltweit starke Positionen in einer ganzen Reihe von Branchen erreicht, doch erweiterte sich dieses Spektrum weltweit führender Industrien ständig, bis die USA in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg zur stärksten Wirtschaftsmacht der kapitalistischen Länder avancierte. Die Durchschnittsproduktivität in Amerika war in den 50er und frühen 60er Jahren die höchste aller industrialisierten Länder, und die Rentabilität vieler Wirtschaftszweige überstieg die potentieller ausländischer Konkurrenten beträchtlich (Porter 1991, S. 307 f.).

Basis dieser Entwicklung sind die klassischen Branchen der Massen- und Großserienfertigung wie beispielsweise im letzten Jahrhundert die Waffenerstellung, der Nähmaschinenbau, die Fahrradproduktion und der Landmaschinenbau (Hounshell 1991), später die Automobilindustrie und die Elektrotechnische Industrie. Demgegenüber kommt Betrieben der komplexeren Fertigung kleinerer bis mittlerer Serien, wie sie sich vor allem im Maschinenbau oder dem Werkzeugmaschinenbau finden, eine vergleichsweise nachgeordnete Stellung zu. Einen Hinweis darauf geben, trotz aller methodischer Bedenken, die Beschäftigtenanteile des Maschinenbaus an der Beschäftigtenzahl der gesamten Industrie der USA: Während der allgemeine Maschinenbau 1970 einen Anteil an der gesamten Beschäftigtenzahl der Industrie von knapp 10 % aufwies, umfaßte der Werkzeugmaschinenbau einen Anteil von nur 0,5 %. Das im Vergleich größere

		1950	1970	1980	1990
Motor vehicles and equipment	abs. %	756,9 5,1	716,2 3,7	714,3 3,5	704 3,7
Electric, Electronic equipment	abs. %	-	1.831,6 9,5	1963,2 9,5	1.497 8,0
Machinery	abs. %	1.367,8 9,3	1.890,6 9,8	- -	1.877 10,0
Machine tools *	abs. %	- -	100,2 0,5	99,7 0,5	66,0 0,4
Aircraft and parts	abs. %	289,5 2,0	648,2 3,4	580,5 2,8	616
All industries	abs.	14.769,9	19.217,2	20.644,9	18.840
* Metal-cutting plus metal-forming					
Quellen: United States Bureau of the Census: Annual Survey, versch. Jahrgänge; United States Bureau of the Census 1972; Statistical Abstract of the United States 1992; eigene Berechnungen					
Tabelle 6	Entwicklung der Industriestruktur der USA nach Beschäftigten (in Tausend und % der gesamten Industrie)				

Gewicht dieser Branchen in der deutschen Industriestruktur zeigt sich daran, daß in der Bundesrepublik im gleichen Zeitraum der gesamte Maschinenbau einen Beschäftigtenanteil von rd. 14 % und der Werkzeugmaschinenbau von ca. 1,5 % an den Beschäftigten im Verarbeitenden Gewerbe aufwiesen (Tab. 6, 7; Kap. VII).

		1950	1960	1970	1980	1990
Straßenfahrzeugbau	abs. %	206,6 4,2	409,8 5,2	609,3 7,1	781,1 10,7	861,3 12,1
Elektrotechnische Industrie	abs. %	319,8 6,5	103,0 1,3	1.072,1 12,4	943,7 12,9	1.004,7 14,1
Maschinenbau	abs. %	479,2 9,8	945,2 12,0	1.202,4 14,0	1.090,3 14,9	1.157,8 16,3
Werkzeugmaschinenbau	abs. %	40,1 0,8	103,0 1,3	125,0 1,5	99,0 1,4	103,0 1,4
Luft- und Raumfahrtindustrie	abs. %	- -	15,0 0,2	48,8 0,6	61,1 0,8	78,0 1,1
Verarbeitendes Gewerbe	abs.	4.914,7	7.892,1	8.618,4	7.321,6	7.105,0
Quellen: VDMA, versch. Jahrgänge; DIW, versch. Jahrgänge; Statistisches Bundesamt 1993; eigene Berechnungen						
Tabelle 7	Entwicklung der Industriestruktur der BRD nach Beschäftigten (in Tausend und % des Verarbeitenden Gewerbes)					

Teil dieser Branchenstrukturen sind einmal Konzerne und Großunternehmen mit ihren taylorisierten Produktionsstrukturen, deren Anteil am gesamten Produktionsausstoß der amerikanischen Industrie seit den 20er Jahren rapide stieg (Piore, Sabel 1985, S. 60 ff.). Zugleich jedoch kommt auch kleineren und kleinsten Betrieben - den job shops - vor allem in der Metallindustrie seit jeher ein gewisses Gewicht - etwa als regional konzentrierte Zulieferer der Konzerne - zu (Noble 1984, S. 213; Piore, Sabel 1985,

S. 268 ff.); so machten 1972 Betriebe mit weniger als zehn Beschäftigten mehr als 50 % aller von der Industriestatistik erfaßten Betriebe aus. Das für die Industriestruktur der Bundesrepublik typische Feld mittlerer Betriebe mit weniger als 500 Beschäftigten ist in den USA hingegen im Vergleich unterrepräsentiert; 1972 wies es einen Anteil von rd. 47 % auf (Tab. 8).

		USA*		BRD**	
		Betriebe	Besch. (Tsd.)	Betriebe	Besch. (Tsd.)
Kleinstbetriebe 1- 9 Besch.	abs. %	158.985 50,8	508,8 2,8	41.047 42,5	156,1 1,9
Kleinbetriebe 10-99 Besch.	abs. %	119.255 38,1	3.961,0 22,0	41.256 42,7	1.469,0 17,8
Mittlere Betriebe 100-499 Besch.	abs. %	28.832 9,2	6.017,2 33,4	11.593 12,0	2.447,0 29,6
Größere Betriebe 500-999 Besch.	abs. %	3.481 1,1	2.370,0 13,1	1.631 1,7	1.126,4 13,6
Großbetriebe 1000 -... Besch.	abs. %	2.109 0,7	5.175,4 28,7	1.127 1,2	3.064,8 37,1
Betriebe gesamt		312.662	18.032,4	96.654	8.263,3
* All industries; ** Verarbeitendes Gewerbe					
Quellen: United States Bureau of the Census 1972; Statistisches Bundesamt 1974; eigene Berechnungen					
Tabelle 8	Betriebe und Beschäftigte in der gesamten Industrie der USA und der Bundesrepublik nach Größenklassen 1972 (in %)				

Eine wesentliche Voraussetzung für das Aufkommen dieser Betriebs- und Branchenstrukturen waren die besonderen Absatzmarktstrukturen in Nordamerika, die von einem großen und aufnahmefähigen Inlandsmarkt geprägt waren, der über Jahrzehnte hinweg expandierte - unterbrochen freilich von der Weltwirtschaftskrise. Neben der Größe erwies sich vor allem die Zusammensetzung des US-Marktes als wichtig für die Entwicklung der Massenproduktion. Es entstand ein Markt für Massenkonsumgüter, lange bevor etwa in Westeuropa oder Japan ähnliche Marktstrukturen erkennbar waren. Er ermöglichte den Absatz billiger und standardisierter, zugleich aber auch völlig neuartiger Konsumgüter. Damit in Zusammenhang entwickelte sich der Markt für Industrie- und Investitionsgüter, der sich gleichfalls durch ein ständig steigendes Volumen wie aber auch durch eine wachsende Breite und Differenziertheit der Nachfrage nach Investitionsgütern aus sehr verschiedenen Branchen auszeichnete. Durch den Inlandsverkauf an Konzerne, die zugleich weltweit führend waren, erlangten amerikanische Betriebe daher bei den verschiedensten Investitionsgütern, nicht nur bei Werkzeugmaschinen, in technischer Hinsicht eine führende Stellung auf den internationalen Märkten (Porter 1991, S. 321 ff.).

Die unbestreitbaren Konkurrenzvorteile der amerikanischen Industrie in den ersten Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg führten allerdings nicht zu einer systematischen Ausweitung des Exports. Die meisten Massenproduzenten der USA konzentrierten sich über Jahrzehnte hinweg auf den Binnenmarkt. Der Exportmarkt spielte nur für jene Branchen eine wichtigere Rolle, wo der Nachfrage amerikanischer Auslandsunternehmen nachgekommen wurde oder - wie nach 1945 - wo auf ausländischen Märkten Anbieter fehlten und daher eine große Nachfrage bestand (Piore, Sabel 1985, S. 72 ff.; Porter 1991, S. 325 f.); mithin finden sich im Vergleich zu westeuropäischen Ländern geringe Exportquoten der USA, die bis Ende der 70er Jahre teilweise weit unter 10 % des Bruttosozialproduktes lagen (Tab. 9). Lediglich der Maschinenbau und hier wiederum besonders der Werkzeugmaschinenbau wiesen seit vielen Jahrzehnten aufgrund ihrer technischen Spitzenposition durchschnittlich weit höhere Exportquoten auf (VDMA 1992); so zeichnete sich der Werkzeugmaschinenbau der USA noch Mitte der 70er Jahre durch eine Exportquote von deutlich mehr als 20 % aus (Tab. 14).

Diese stabilen Absatzmarktbedingungen waren eine der Voraussetzungen dafür, daß die Strategien der meisten amerikanischen Unternehmen sich

	USA		BRD	
Jahr	Export	Import	Export	Import
1950	4,9	4,2	11,0	13,0
1955	5,0	4,5	20,0	17,5
1960	5,5	4,6	20,0	17,0
1965	5,7	4,7	19,0	19,0
1970	6,4	6,0	22,0	20,0
1975	9,6	8,3	26,0	23,5
1980	12,9	12,0	28,5	29,0
1985	-	-	29,1	25,1
1990	6,9	9,6	36,4	29,5
1991	-	-	38,6	31,4
Quellen: Piore, Sabel 1985; Statistisches Bundesamt, versch. Jahrgänge; Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 1992 für das Ausland; eigene Berechnungen				
Tabelle 9	Güter- und Dienstleistungsexporte und -importe in % des Bruttosozialprodukts			

auf eine möglichst kurzfristige Maximierung des Profits richten konnten und können. Langfristig angelegte und unter Umständen kostenträchtige Maßnahmen, die sich etwa auf die Sicherung der betrieblichen Innovationsfähigkeit und die Steigerung der Produktivität durch fertigungstechnische Innovationen richteten, waren vor allem bei den Großbetrieben der Massenproduktion bislang eher die Ausnahme denn die Regel. Im Zentrum des betrieblichen Interesses stand und steht bis heute der Ausweis eines möglichst hohen "quarterly profits", der - in den letzten Jahren offenbar noch verstärkt - als nahezu einziger Gradmesser unternehmerischen Erfolgs gilt.

Die Bedeutung des "quarterly profits" hängt, folgt man der einschlägigen Literatur, insbesondere mit den spezifischen Finanzierungsbedingungen amerikanischer Unternehmen zusammen: Verwiesen wird zum einen auf die in den USA im Vergleich zu anderen Ländern in den letzten beiden Jahrzehnten hohen Kapitalkosten, die auf eine schnelle Amortisation von Investitionen drängen. Zum zweiten wird die hohe Eigenkapitalquote der amerikanischen Unternehmen angeführt. Bei den Kapitaleignern handelt es sich häufig um Investment- und Rentenfonds, die ausschließlich an hohen Kursen ihrer Anlagen interessiert sind,

die wiederum durch möglichst hohe Dividenden und günstige Bilanzzahlen der jeweiligen Unternehmen gesichert werden können. Darüber hinaus ist auch das jeweilige Management in der Regel an kurzfristigen Gewinnen interessiert, da die erfolgsabhängigen Managementgehälter zumeist auf der Basis kurzer Zeiträume errechnet werden. Insbesondere dieses Managementinteresse wird als eine wichtige Ursache dafür angesehen, daß langfristig angelegte sich auf Produkt- und Prozeßinnovationen richtende Unternehmensstrategien vermieden werden, weil sie Risiken bergen und den kurzfristigen Umsatz und Profit gefährden können (Hayes, Abernathy 1980; Thurow 1987; Dertouzos et al. 1989, S. 61 ff.).

Neben den Absatzmarktbedingungen waren die spezifischen Arbeitsmarktbedingungen eine weitere strukturelle Voraussetzung der amerikanischen Massenproduktion. Der vorherrschende Typus von tayloristischen Arbeitssystemen - arbeitsmarkttheoretisch als betriebsinterner Arbeitsmarkt gefaßt (Sengenberger 1987, S. 150 ff.) - basiert auf ausgeprägten Formen betriebsinterner Anlernung und Qualifizierung. Dies gilt nicht nur für die Großbetriebe der standardisierten Massenproduktion, sondern auch für die Mehrzahl der vielen Klein- und Kleinstbetriebe (ebd.). Durch eine ausgeprägte hierarchische und fachliche Arbeitsteilung ermöglicht die Arbeitsorganisation, daß kontinuierlich oder bei Bedarf zusätzliche Arbeitskräfte ohne besondere Ausbildung und Erfahrung eingestellt und nach kurzem Anlernen produktiv eingesetzt werden können. Über langfristig angelegte Prozesse der betriebsinternen, zumeist informellen - "learning by doing" - Qualifizierung entlang festgefügtter, nach Senioritätsregeln festgeschriebener Mobilitätsketten, deren Inhalt ausschließlich von speziellen betrieblichen Gegebenheiten und Erfordernisse definiert wird, werden die erforderlichen Qualifikationen bereitgestellt.¹

Die jahrzehntelange Stabilität derartiger Arbeitssysteme in den USA, deren Ursprung bis ins letzte Jahrhundert zurückreicht (z.B. Hounshell 1991, S. 67 ff.), erklärt sich zunächst aus spezifischen personalwirtschaftlichen Interessen der Betriebe. Ihr Hauptinteresse war, angesichts des großen Arbeitsmarktreservoirs zumeist nur ungelernter Arbeitskräfte, die notwendigen Qualifizierungs- und Rekrutierungskosten dauerhaft gering zu halten. Als Folge der fortschreitenden Verbreitung dieser Arbeitssysteme ist seit Jahrzehnten eine Erosion der in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts noch weit verbreiteten Formen institutionalisierter betriebszentrierter Aus- und Weiterbildung, dem zumeist gewerkschaftlich kontrollierten

1 Zu den Entwicklungsbedingungen interner Arbeitsmärkte in der amerikanischen Automobil- und Metallindustrie vgl. vor allem auch Köhler 1981.

"Apprenticeship System", zu beobachten. Folgt man der vorliegenden Literatur (Wagoner 1968; Noble 1984; Herrigel 1988), so steht diese Entwicklung unmittelbar in Zusammenhang mit der fortschreitenden Durchsetzung des Modells der Massenproduktion: einer zunehmenden Entwertung qualifizierter Arbeit und einem wachsenden Desinteresse der Betriebe an Aus- und Weiterbildung sowie der generell abnehmenden Zahl mittlerer Betriebe, die früher vielfach Träger betrieblicher Ausbildung waren. Beschleunigt wurde diese Erosion im Verlauf des Zweiten Weltkriegs, wo betriebliche Personalpolitik in den USA nahezu ausschließlich nach Maßgabe kurzfristiger Einsetzbarkeit verlief und die Spezialisierung der Produktionsprozesse dramatisch vorangetrieben wurde.

In den 50er und 60er Jahren gerieten die noch verbliebenen Reste betrieblicher Aus- und Weiterbildung zunehmend unter den Druck der nur mehr an kurzfristigen monetären Erfolgen ausgerichteten Betriebspolitiken. Mit dem Ziel, den "quarterly profit" zu maximieren, wurde auf systematische Aus- und Weiterbildung, sieht man von einigen Ausnahmen ab, endgültig verzichtet (Thurow 1987; Dertouzos et al. 1989, S. 90 ff.). In den 80er Jahren war der Anteil der Arbeitskräfte, die eine formale Lehrlingsausbildung durchlaufen haben, an der Gesamtzahl von Arbeitskräften, die eine Industriearbeit erstmals aufnehmen, verschwindend gering; vorliegenden Schätzungen zufolge waren dies regelmäßig weniger als 150.000 im Vergleich zu einer Gesamtzahl von jährlich ca. zwei Millionen neuen Arbeitskräften (Kazis et al. 1989, S. 11). Diese Situation betrifft insbesondere auch den Werkzeugmaschinenbau, der nach wie vor auf vergleichsweise qualifizierte Arbeitskräfte angewiesen wäre. Beispielsweise haben drei der im Verlauf der Erhebungsarbeiten besuchten NC- und Werkzeugmaschinenhersteller ihr betriebliches Ausbildungswesen mit der Absicht, Kosten zu minimieren, in den 60er Jahren abgeschafft.

Zugleich basiert das vorherrschende Arbeitssystem des internen Marktes auf Formen industrieller Beziehungen, deren Hauptkonfliktfeld Auseinandersetzungen um die Arbeitskontrolle sind. Es bestehen in den Industrien der Massenproduktion kollektivvertraglich festgeschriebene Arbeitsregelungen mit einer genauen Definition von Tätigkeiten und darauf bezogene Senioritätsnormen. Arbeitszuweisung, Stellenbesetzung, innerbetrieblicher Aufstieg und Rekrutierungsprinzipien der tayloristischen Form der Arbeitsorganisation und des Personaleinsatzes werden durch diese Regelungen gesteuert (Köhler 1981; Piore, Sabel 1985, S. 126 ff.).

Vermittelt durch die festgeschriebene Struktur des Arbeitssystems werden auch Technikeinsatz und Technikinnovationen beeinflusst. Technische Innovationen lassen sich unter diesen Bedingungen, wenn überhaupt, nur schwer realisieren, weil die dann erforderlichen arbeitsorganisatorischen Anpassungsmaßnahmen abgestimmt werden müssen mit dem rigiden System der "work rules", wodurch Konflikte hervorgerufen und Verhandlungen mit den Gewerkschaften notwendig werden. Gewerkschaften wie aber auch das Management haben ein hohes Interesse an der Aufrechterhaltung des einmal etablierten Systems der Arbeitsplatzregelungen, da sich in ihm die eingespielten innerbetrieblichen Machtpositionen niederschlagen. Um den Status quo der betrieblichen Herrschaftsstruktur zu erhalten, wurde vor allem in der Vergangenheit vielfach auf Modernisierungsmaßnahmen ganz verzichtet oder es werden nur solche technische Innovationen vorgenommen, die sich in die gewachsenen Strukturen einfügen lassen und sie nicht in Frage stellen (Piore, Sabel 1985, S. 128; Erd 1989, S. 140 ff.).

1.2 Konservative Entwickler-Anwender-Beziehungen

a) Geringer Innovationsdruck der Massenproduzenten

Aus diesen industriestrukturellen Bedingungen resultiert ein nur geringer Innovationsdruck auf die fertigungstechnische Entwicklung, die über Jahrzehnte hinweg von den inländischen Großanwendern dominiert wurde. Spätestens seit den 20er Jahren wurden die Entwicklung und der Absatz von Werkzeugmaschinen von den Betrieben der Automobilindustrie, dem Landmaschinenbau oder der Elektrotechnischen Industrie bestimmt (Brown 1957). Insbesondere zwischen dem Werkzeugmaschinenbau und der Automobilindustrie bestanden über lange Jahrzehnte hinweg enge, hierarchisch strukturierte Beziehungen bei der Entwicklung von Werkzeugmaschinen. So wurden verschiedentlich Prototypen von Werkzeugmaschinen zunächst von den Automobilherstellern entwickelt und diese dann von Werkzeugmaschinenbetrieben übernommen und in Serie produziert (Hounshell 1991, S. 231 ff.). Die hohe Bedeutung der Automobilindustrie für die fertigungstechnische Entwicklung in den USA belegen Zahlen, denen zufolge diese Branche in den 70er Jahren mit einem Anteil von 28 % bis 30 % am gesamten Inlandsmarkt der größte Anwender von Werkzeugmaschinen war (CMT 1983, S. 53).

Dies verweist auf die spezifischen betrieblichen Einsatzbedingungen von Fertigungstechnik, die eben durch die taylorisierten Produktionsprozesse geprägt sind. Diesen Strukturen entspricht die hohe und langjährige Bedeutung konventionell automatisierter, spezialisierter Maschinenkonzepte - vielfach als "Detroit-Automatisierung" bezeichnet - und das bis in die 70er Jahre hinein kaum vorhandene Interesse der Massenhersteller an flexibler, computergestützter Automatisierung der Fertigungstechnik. Aufgrund der stabilen Prozeßbedingungen und der damit verbundenen betrieblichen Interessen- und Machtkonstellationen war in den Betrieben der Großserien- und Massenfertigung eine Investitionspolitik vorherrschend, die sich lediglich auf das Ersetzen vorhandener Techniken, nicht aber auf ihr "upgrading" richtete (ebd., S. 74). Es war nicht nur so, daß diese Anwender kein Interesse an Innovationen hatten, sondern vielfach verhinderten sie Innovationsversuche des Werkzeugmaschinenbaus, weil sie vermeintliche Risiken und Zusatzkosten vermeiden wollten (March et al. 1989, S. 15 ff.).

Lediglich in einigen wenigen Branchen wie im Werkzeug-, Formen- und Vorrichtungsbau entstand schon in den 60er Jahren ein Interesse am Einsatz von flexibel automatisierten NC-Maschinen. Dort erwies sich die amerikanische NC-Technik vor allem aufgrund der damit möglichen Automatisierung der Bearbeitungsprozesse komplexer Teile schon relativ frühzeitig als Mittel, um den hohen Aufwand dieser fertigungsvorbereitenden Prozesse zu reduzieren. So führte einer der besuchten Werkzeugmaschinenhersteller schon in der ersten Hälfte der 60er Jahre NC-Maschinen im Werkzeug- und Formenbau ein, um die dort erforderlichen langen Fertigungszeiten zu reduzieren. Daneben ging es um die Kompensation zunehmender Qualifikationsengpässe infolge der fortschreitenden Erosion der Systeme betriebszentrierter Ausbildung, die in dieser qualifikationsintensiven Branche zum Problem wurden.

Gegenüber den konservativen Strategien der großen Anwender aus dem Inland spielten die Interessen kleiner und mittlerer Anwenderbetriebe eine nur nachgeordnete Rolle. Ebenso hatten Anforderungen, die aus dem Export von Maschinen und Anlagen resultierten, kaum Einfluß auf den Verlauf der Technikentwicklung. Obgleich der amerikanische Werkzeugmaschinenbau seit den 50er Jahren mit durchschnittlich 20 % einen im Vergleich zur gesamten Industrie der USA hohen Exportanteil aufwies, wurden die davon ausgehenden Innovationsanforderungen zu keiner Zeit für die Entwicklung insgesamt bestimmend. Vielmehr basierten die zeit-

weiligen Exporterfolge des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus gerade auf den besonderen, unter US-Bedingungen entwickelten und bewährten Technikkonzepten (CMT 1983, S. 24 ff.; Tab. 14).

b) Fragmentierte Entwicklerkonstellation

Fertigungstechnische Innovationen fanden unter diesen Anwendungsbedingungen nahezu ausschließlich in Betrieben des Werkzeugmaschinen- und Anlagenbaus statt. Obgleich in den letzten Jahrzehnten vor allem der Werkzeugmaschinenbau von einem zunehmenden Konzentrationsgrad geprägt war, ist er bis heute fragmentiert und von einem für die US-Industrie untypisch hohen Anteil von kleineren Betrieben gekennzeichnet (DiFilippo 1986, S. 39 ff.; Collis 1988, S. 82). Jedoch wurde die technische Entwicklung primär von einer geringen Zahl großer und mittelgroßer Werkzeugmaschinenhersteller, wie z.B. Cincinnati Milacron, Ingersoll, Bridgeport oder Brown & Sharpe, getragen, die teilweise durch eine Vielzahl kleiner, teilweise sehr spezialisierter Hersteller ergänzt wurde.

Besonderes Merkmal dieser Entwicklerkonstellation ist, daß "horizontal" zwischen den beteiligten Unternehmen so gut wie keine Kooperationsbeziehungen bei der Technikentwicklung bestehen. Kooperative Entwicklungsprozesse oder zumindest ein Austausch von Know-how und Erfahrungen waren und sind im amerikanischen Werkzeugmaschinenbau kaum üblich. Auch finden sich in "vertikaler" Hinsicht, etwa zu den Entwicklern von Komponenten und einzelnen Maschinenelementen oder auch zu den sehr wenigen in den USA vorhandenen, an industriellen Anforderungen ausgerichteten ingenieurwissenschaftlichen Instituten (Kap. VI, 2.), kaum kontinuierliche Kooperationsbeziehungen; vorherrschend sind bis heute rein marktmäßige Beziehungen. Es gab Versuche, Kooperationsbeziehungen zu Computer- und Steuerungsherstellern aufzunehmen. Doch hatten sie für die Mehrheit der kleineren und mittleren Werkzeugmaschinenhersteller lediglich punktuellen Charakter, da sich die Steuerungshersteller, wie gezeigt, mit ihren Entwicklungsanstrengungen an den Interessen der großen Werkzeugmaschinenhersteller und den Erfordernissen komplexer High-Tech-Lösungen - vor allem für die Luft- und Raumfahrtindustrie - orientierten.

Aufs Ganze gesehen wurde daher die Entwicklung der zumeist konventionellen Fertigungstechniken von einzelnen, isoliert voneinander agierenden

Herstellern vorangetrieben. Erkennbar ist damit im Maschinenbau ein Muster von Forschung und Entwicklung, das sich seit langem bei der Mehrheit der zivilen amerikanischen Industrie findet: Industrielle Forschung und Entwicklung wurden in den USA seit Beginn des 20. Jahrhunderts zunehmend zu einer betriebsinternen, "vertikal integrierten" Angelegenheit.

Ein typisches Beispiel hierfür ist der mittelgroße Werkzeugmaschinenhersteller Brown & Sharpe, der in den 60er und frühen 70er Jahren immer wieder versuchte, eigene NC-Steuerungen zu entwickeln. Den Angaben der in diesem Betrieb interviewten Managementvertreter zufolge, lag der Hauptgrund für diese Politik darin, daß man damals versuchte, die Wertschöpfung der Produkte möglichst vollständig im eigenen Hause zu behalten. Außerdem orientierte man sich an den Vorbildern großer Werkzeugmaschinenhersteller, die damals relativ erfolgreich eigene Steuerungen entwickelten. Das war auch das Motiv dafür, daß dieser Hersteller Anfang der 70er Jahre eine kleine Computerfirma aufkaufte.

Gründe für diese vorherrschende Politik der vertikalen Integration liegen unter anderem im weitgehenden Verbot jeglicher Form von Interessensabreden zwischen Betrieben durch die Anti-Trust-Gesetzgebung der USA, die auch schon "lockere Verbindungen" zwischen Betrieben bis in die jüngste Zeit nahezu unmöglich machte und wodurch ohnehin existierende Tendenzen konkurrenzbedingter Abschottung verstärkt wurden (Hollingsworth 1991, S. 23 ff.).²

Aus diesen Gründen spielen im Prozeß fertigungstechnischer Entwicklung Verbände, etwa für die Vermittlung von Kontakten und Know-how zwischen verschiedenen Entwicklern, im Unterschied zur Bundesrepublik bis heute in den USA so gut wie keine Rolle. Obgleich es im Bereich des Maschinenbaus, wie generell in der US-Industrie, eine ganze Reihe von Ingenieurvereinigungen und Industrieverbänden gibt, beschränkt sich deren Funktion hauptsächlich auf Standespolitik und Interessenvertretung gegenüber der Bundesregierung. Typisches Beispiel ist der NMTBA (National Machine Tool Builders Association), der sich nicht mit technischen Fragen befaßt, sondern sich als reine Lobbyorganisation für die ökonomischen Interessen des Werkzeugmaschinenbaus versteht (Herrigel 1988, S. 9; Hollingsworth 1991).³

-
- 2 Erst 1984 wurden diese Regelungen nicht zuletzt infolge der Anforderungen des SDI-Forschungsprogramms an kooperative Entwicklungsprozesse durch den "National Cooperative Research Act" gelockert (Porter 1991, S. 550).
 - 3 Daß Verbände gleichfalls unter dem Vorbehalt der Anti-Trust-Gesetzgebung standen, belegen die vorsichtigen Versuche des MIT, Anfang der 60er Jahre eine NC-Society zu gründen. Zu den dafür veranstalteten Treffen von Wissenschaftlern und Industrievertretern wurde - "wisely" - immer auch ein Rechtsanwalt geladen (Reintjes 1991, S. 163 f.).

Die Entwicklung konventioneller Fertigungstechniken basierte unter diesen Bedingungen auf begrenzten einzelbetrieblichen Ressourcen in Hinblick auf investiertes Kapital, Zeit und Know-how. Die Verteilung der Ressourcen war zudem sehr ungleich, sie konzentrierten sich auf die wenigen Großbetriebe der Branche. Insbesondere erwiesen sich die personellen Ressourcen als sehr begrenzt. In der überwiegenden Zahl der kleineren bis mittleren Werkzeugmaschinenbetriebe wurden die Entwicklungsaktivitäten nur von einer geringen Zahl qualifizierter und systematisch ausgebildeter Techniker und Ingenieure getragen. Vorherrschend ist in sehr vielen Werkzeugmaschinenbetrieben bis heute ein innerbetrieblicher Aufstieg in die Konstruktion, verbunden mit der Akkumulation empirischen Wissens. Nur verschiedentlich findet sich im Werkzeugmaschinenbau der USA der Direktzugang schulisch ausgebildeten Personals in die Bereiche von Konstruktion und Entwicklung (König u.a. 1990; Herrigel 1988). Der knappe Bestand an qualifiziertem technischen Personal wird zudem durch die auch diese Beschäftigtengruppe betreffende Unstetigkeit der betrieblichen Personalpolitik verschärft.

Ein - überaus grober - Indikator für diese Situation ist, daß Anfang der 60er Jahre mehr als 70 % der in der gesamten Industrie beschäftigten Ingenieure der USA in Großbetrieben mit mehr als 1.000 Beschäftigten arbeiteten (Perucci 1971, S. 500). Demgegenüber waren im gleichen Zeitraum im deutschen Maschinen- und Anlagenbau in solchen Großbetrieben nur rund 45 % aller Ingenieure beschäftigt, während immerhin 13 % dieser Berufsgruppe in Kleinbetrieben mit bis zu 99 Beschäftigten angestellt waren (VDMA 1988).

Daher sind bis heute in vielen Werkzeugmaschinenbetrieben die Konstruktionsabteilungen unterentwickelt; nicht selten handelt es sich hierbei lediglich um Betriebsbereiche für Detailkonstruktion und das Erstellen technischer Zeichnungen (Dertouzos et al. 1989, S. 69 ff.; König u.a. 1990).

Nicht überraschend ist schließlich, daß die FuE-Aufwendungen des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus bislang begrenzt waren und im internationalen Vergleich als unterdurchschnittlich eingeschätzt werden. Dabei liegen die vorliegenden Angaben relativ weit auseinander; sie schwanken zwischen einem Anteil von 1,5 % und 4,1 % am Umsatz für den Anfang der 70er Jahre (CMT 1983, S. 13 f.). Als deutlich höher hingegen gilt die FuE-Intensität des bundesdeutschen Werkzeugmaschinenbaus, die für Ende der 70er Jahre mit durchschnittlich 8 % des Umsatzes beziffert wird (Geer u.a. 1980, S. 153).

c) Konventionelle Maschinenkonzepte und Entwicklungsziele

Überwiegend entstanden daher im Rahmen dieses Innovationsmusters konventionelle Werkzeugmaschinen, die je nach industrieller Anforderung weiterentwickelt und modifiziert wurden. Entsprechend den dominanten Anwendungsbedingungen der Massenproduktion handelt es sich dabei um standardisierte Maschinen begrenzter Einsatz- und Anwendungsflexibilität. Sie sind abzugrenzen einerseits gegenüber den Konzepten kundenspezifischer, u.U. hochkomplexer Einzweckmaschinen, andererseits gegenüber der Entwicklung von Universalwerkzeugmaschinen, die die ganze Breite eines oder mehrerer Verfahren der Metallbearbeitung abdecken - beides vornehmlich auch in Deutschland verfolgte Entwicklungen. Diese als Spezialmaschinen zu charakterisierenden Werkzeugmaschinen wurden in den USA in mittleren bis größeren Serien hergestellt, wobei auf eine größere Typenvielfalt verzichtet wurde. Nach einer stürmischen Innovationsphase in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts (Rosenberg 1975; Mommertz 1981), in der der amerikanische Werkzeugmaschinenbau Weltgeltung erlangte, waren weitreichende Innovationen über viele Jahrzehnte hinweg eher die Ausnahme, denn die Regel.

Typisches Beispiel für die geringe Innovationsdynamik im amerikanischen Werkzeugmaschinenbau ist die Entwicklung und Herstellung der bekannten "Bridgeport", eine Standardfräsmaschine. Dieser Maschinentyp wurde ohne größere Varianten und Veränderungen seit 1938 über ein Periode von fast 50 Jahren von dem gleichnamigen Hersteller produziert und verkauft (March et al. 1989, S. 13 f.).

Die in den USA vorherrschenden standardisierten Spezialmaschinen sind durch Robustheit und hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet, und sie erfordern in der Regel nur geringe Qualifikationen bei der Bedienung. Als Leitbild dieser Maschinenkonzeption können die Drehautomaten und die Revolverdrehbank angesehen werden, die im wesentlichen in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts in den USA entwickelt wurden (Ruby 1991); sie erfordern einfache Bedienung und sind für eine begrenzte Zahl von Arbeitsgängen, kurzen Bearbeitungszeiten und Serienproduktion konzipiert.⁴ Eine Kombination derartiger Spezialmaschinen bildete dann

4 Dieses Maschinenkonzept ist im Unterschied zu dem der universellen Spitzendrehbank zu sehen, das paradigmatisch für die deutsche Werkzeugmaschinenentwicklung stehen kann. Zur Differenz zwischen Revolverdrehbank und Universaldrehbank vgl. auch Freyberg 1989, S. 100 ff.

der Schritt zu Transferstraßen, die eine Fortführung der angeführten üblichen Werkzeugmaschinenkonzepte für den amerikanischen Werkzeugmaschinenbau vor allem in den 50er und 60er Jahren darstellten (DiFilippo 1986; Herrigel 1988).

Die NC-Technik und die späteren mikroelektronisch basierten Fertigungstechniken wurden im skizzierten institutionellen Rahmen nicht entwickelt; sie wurden partiell von einigen Werkzeugmaschinenbauern übernommen und an bestehende Maschinen und Anlagen angepaßt. Dies galt insbesondere für die 60er Jahre, in denen relativ viele Werkzeugmaschinenhersteller die NC-Technik übernahmen und für ihre angestammten zivilen Absatzfelder weiterzuentwickeln suchten (Kap. IV, 1.).

Typisch hierfür sind die Entwicklungsstrategien des schon erwähnten Werkzeugmaschinenherstellers Brown & Sharpe. Seit Beginn der 60er Jahre versuchte dieser Hersteller immer wieder, nicht nur NC-Steuerungen zu übernehmen und an seine konventionellen Maschinen, hauptsächlich Fräsmaschinen, zu adaptieren, sondern auch eigene NC-Steuerungen zu entwickeln. Der letzte Versuch dieser Art wurde Anfang der 70er Jahre unternommen. Ein Minicomputer des Computerherstellers Sundstrand sollte an NC-Erfordernisse angepaßt werden. Das hierfür erforderliche Know-how hatte sich Brown & Sharpe durch den Einkauf einer kleineren Computerfirma zu beschaffen versucht. Die Entwicklung kam jedoch über Blaupausen und einen Prototyp nicht hinaus und wurde relativ schnell wieder abgebrochen. Dieser Versuch war, nach Einschätzung der Interviewpartner in diesem Betrieb, "no proper business decision".

Schließlich lassen sich auch die verschiedenen, in der Regel immer wieder aufgegebenen Versuche, Alternativlösungen zum vorherrschenden Hauptpfad der NC-Entwicklung im Kontext des zivilen Innovationsmusters verorten. Dies gilt insbesondere für das unmittelbar unter den Anforderungen industrieller Praxis entwickelte Playback-Verfahren, aber auch für die verschiedenen Formen von Programmsteuerungen, die später immer wieder auf den Markt gebracht wurden.

2. Wissenschaftlich-militärisches Innovationsmuster

Grundmerkmal des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters ist der hohe Einfluß relativ anwendungsferner, zumeist wissenschaftlicher und militärischer Institutionen und Akteure bei der fertigungstechnischen Entwicklung und ihr Zusammenspiel mit spezialisierten, marktfernen

Anwenderindustrien. Die mit diesem Muster bezeichneten institutionellen Zusammenhänge und sozialen Akteure können, wie interviewte Experten immer wieder bestätigten, als die "driving force" der Entwicklung rechnergestützter Fertigungstechniken in der Nachkriegszeit angesehen und in Anlehnung an Radkaus Thesen über die Technikentwicklung in den USA kann dieses Innovationsmuster als Element der in den USA häufig anzutreffenden, von der Zivilproduktion isolierten "High-Tech-Inseln" gekennzeichnet werden (1989, S. 33).

2.1 Rüstungsorientierter Staatsinterventionismus

Die institutionellen Momente dieses Innovationsmusters verweisen auf Funktionsbedingungen der amerikanischen Ökonomie, die sich in der Nachkriegszeit nachhaltig veränderten. Ausgangspunkt ist der für die Funktionsfähigkeit des fordistischen Modells der Massenproduktion seit den 30er Jahren unverzichtbare Staatsinterventionismus, der im Verlauf und nach dem Zweiten Weltkrieg nicht nur auf Dauer gestellt, sondern auch massiv ausgeweitet wurde. Es entstand eine - von Mattick (1971) als "mixed economy" bezeichnete - spezifische ökonomische Struktur, deren Hauptmerkmal ein beträchtlicher Anteil des staatlichen Sektors am Bruttosozialprodukt ist. Merkmal dieser ökonomischen Entwicklung war die erhebliche Steigerung der staatlichen Nachfrage insbesondere nach Militärgütern sowie wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen, um auf diese Weise Stagnations- und Rezessionstendenzen beim privaten Absatz und den privaten Investitionen zu kompensieren.⁵ Es entstand ein durch Vertragsbeziehungen geregelter staatlich finanzierter Sektor - "contractual public sector" (Rödel) -, in dem Marktbeziehungen durch politische Entscheidungen ersetzt und ein System staatlich garantierter Profite geschaffen wurde. Die Preise, Qualitätsstandards und Produktionsprogramme der an diesem Sektor beteiligten Unternehmen werden nicht durch Marktbeziehungen erzeugt, sondern durch politische Bargaining-Prozesse, auf die einzelne private Unternehmen erheblichen Einfluß

5 Vgl. zum folgenden die Arbeiten von Melman über den "Pentagon Capitalism" (1970) und "The Permanent War Economy" (1974); Baran, Sweezy (1973, S. 175 ff.) sowie über die Technologiepolitik in den USA insbesondere Rödel (1972, S. 26 ff.). Die Frage nach der Bedeutung des Staatsinterventionismus für die ökonomische Dynamik der Nachkriegszeit wird nochmals im Schlußkapitel (Kap. IX) aufgegriffen.

zu nehmen vermögen. Obwohl der rechtlichen Organisationsform nach der Umfang staatlicher Wirtschaftstätigkeit in den Vereinigten Staaten gering ist, steuert dieser quasi-öffentliche Sektor einen beträchtlichen Teil der Produktion. So machten Käufe von Gütern und Dienstleistungen durch öffentliche Stellen 1969, allerdings auf der Höhe des Vietnamkrieges, einen Anteil von ca. 25 % des Bruttosozialprodukts aus.⁶

Neben der zivilen Anwendung der Kernenergie, dem Weltraumprogramm und der Entwicklung ziviler Transport- und Informationstechniken richteten sich diese staatlichen Aktivitäten, politisch legitimiert durch den Kalten Krieg, zum größten Teil auf den Rüstungssektor. Die relativ krisenfreie Nachkriegsentwicklung des Kapitalismus der Vereinigten Staaten verband sich mit der dauernden Stützung durch einen in den 50er und 60er Jahren ständig 40 bis 70 Milliarden \$ umfassenden Rüstungshaushalt (Vilmar 1969, S. 74). Der Anteil der Militärausgaben am Bruttosozialprodukt betrug in den USA im langfristigen Durchschnitt zwischen dem Beginn der 50er und Mitte der 70er Jahre ungefähr 8 % (Gerybadze, Little International 1988, S. 34). Demgegenüber lagen bislang die Militärausgaben der Bundesrepublik wie auch Japans deutlich darunter: So wiesen diese im Jahr 1971 einen Anteil von rd. 3,3 % bzw. 0,9 % am Bruttosozialprodukt auf (DiFilippo 1986, S. 123).

Daß der staatlich finanzierte Sektor hauptsächlich die Rüstungsproduktion umfaßt, hat vielfältige Gründe: Einmal wird damit vermieden, daß dieser Sektor in direkte Konkurrenz zu den marktorientiert agierenden Industriezweigen tritt und deren Profitmöglichkeiten schmälert. Weiterhin werden damit die Voraussetzungen für die weltweite militärische Präsenz der USA und die Sicherung des Rohstoffzugangs geschaffen (Mattick 1971, S. 128 ff.; Baran, Sweezy 1973, S. 175 ff.). Endlich liegt im Fall der USA ein wichtiger Grund im historisch spezifischen Verhältnis zwischen Staat und Privatindustrie. In den USA fand die industrielle Entwicklung weitgehend unabhängig von staatlichen Eingriffen und staatlicher Förderung statt, und zwischen privater Industrie und staatlichen Instanzen existieren bis heute - ausgenommen die Rüstungsindustrie - keine engen, auf Kooperation angelegten Beziehungen zwischen industriellen und staatlichen Akteuren (Hollingsworth 1991). Ausgeprägte Konkurrenzbeziehungen zwischen Industriebetrieben und die bekannten Anti-Trust-Gesetze

6 Vgl. Rödel 1972, S. 28, und die dort angegebenen Quellen.

verhinderten lange Zeit, daß staatliche Politik sich auf die Unterstützung ziviler Industriezweige konzentrierte. Es gab bislang in den USA keine explizite Industriepolitik, die sich auf die Förderung und Subventionierung ziviler Industriebranchen richtete (Junne 1985, S. 28 f.).⁷

a) Wachstum der Rüstungsindustrie

Es entstand damit ein von Kritikern als "permanent war economy" (Mills) bezeichneter industrieller Sektor, in dem das Department of Defense (DOD) als größter Auftraggeber der Industrie auftrat und bestimmte Industriezweige durch die mehr oder weniger dauerhafte Sicherung ihres Absatzes priorisiert wurden. War die ökonomische Entwicklung bis zum Zweiten Weltkrieg immer nur durch eine kurzfristige militärische Mobilisierung der Industrie in Kriegs- und Krisenzeiten gekennzeichnet, so ist seitdem ein anhaltender Trend des Aufbaus einer stabilen Militärindustrie beobachtbar. Das wachsende industriestrukturelle Gewicht dieses "militärisch-industriellen Komplexes"⁸ ist zentrales Element des amerikanischen Staatsinterventionismus. So wurde Mitte der 60er Jahre die Zahl der Arbeitsplätze für den gesamten Rüstungssektor auf 12 bis 14 Mio. geschätzt, was einem Anteil von rund 11 % aller Arbeitskräfte in den USA entsprach (Melman 1964).

Nutznießer dieser Situation war seit den 40er Jahren insbesondere die Luft- und Raumfahrtindustrie und die mit ihr verbundenen Zulieferunternehmen. Die Verschränkung dieses Industriesektors mit dem staatlich finanzierten Sektor zeigt sich daran, daß der Anteil von Regierungsaufträgen bei den 30 bedeutendsten Unternehmen der Luft- und Raumfahrtindustrie, den Hauptvertragsnehmern des Department of Defense, in den 60er Jahren beständig zwischen 30 und 100 % betrug (Rödel 1972, S. 28). So wies der Militäranteil am gesamten Inlandsabsatz dieses Industriesektors 1968 während des Vietnamkrieges mit rd. 68 % einen Spitzenwert auf, war 1979 auf ca. 37 % gefallen, um in den 80er Jahren wieder beträchtlich

7 Erst seit Beginn der 90er Jahre werden in den USA, offensichtlich ernsthafter als früher, die Möglichkeiten einer zivil ausgerichteten Industriepolitik diskutiert (z.B. Branscomb 1992).

8 Dieser Begriff wurde Anfang der 60er Jahre vom damals scheidenden Präsidenten Eisenhower in die politische Diskussion gebracht, um auf den zunehmenden politischen und ökonomischen Einfluß der Rüstungsindustrie hinzuweisen (Cook 1962).

anzusteigen (Bluestone et al. 1981, S. 49 f.). Dominierte zunächst die Herstellung von Flugzeugen, so gewann spätestens ab Mitte der 50er Jahre die Produktion von Raketen zunehmende Bedeutung, die schon Anfang der 60er Jahre fast ein Drittel des Umsatzes dieser Industrie ausmachte (ebd., S. 39). Über diese Absatzbeziehungen hinaus wurde und wird die Investitionspolitik der Luft- und Raumfahrtindustrie von der amerikanischen Bundesregierung massiv unterstützt. Dies geschieht nicht nur im Rahmen einer ganzen Reihe von Investitions- und Modernisierungsprogrammen (s.u.), sondern es war auch bis Ende der 50er Jahre üblich, daß das Department of Defense für seine Hauptvertragsnehmer aus der Luft- und Raumfahrtindustrie ganze Werke aufbaute und ihnen dauerhaft zur Verfügung stellte, so daß private Investitionen - etwa für die Fertigung neuer Militärflugzeuge - gänzlich unnötig waren (ebd., S. 111 f.)

Seit den frühen 50er Jahren gewann die Luft- und Raumfahrtindustrie gegenüber den zivilen Branchen der Massengüterherstellung ganz erheblich an Gewicht und entwickelte sich zu einer der größten Industriezweige der USA. Vorliegenden Zahlen zufolge hatte die Branche "Aircraft and Parts" 1946 ca. 237.000, 1950 ca. 290.000, 1954 mehr als 800.000 und 1970 rd. 650.000 Beschäftigte. In den 70er Jahren reduzierte sich allerdings der Beschäftigtenstand nicht unerheblich, bis er 1980 wieder ca. 580.000 und 1990 mehr als 600.000 erreicht hatte (Tab. 6; ebd., S. 33 f.).⁹ Dieser Industriezweig konzentrierte sich auf wenige Großunternehmen, Teilbranchen und Regionen. Er wuchs gemessen an Umsatz und Beschäftigung überproportional, und er wurde nach der Automobilindustrie zum zweitgrößten Arbeitgeber und zur wichtigsten Exportindustrie der USA (Gerybadze, Little International 1988, S. 15, 206); so betrug der Exportanteil am Umsatz der großen Flugzeughersteller Ende der 70er Jahre bis zu 50 % (Bluestone et al. 1981, S. 7).

b) Förderung militärischer Großforschung

Innovationspolitische Konsequenz der staatsinterventionistischen Politik in den USA war die Förderung von großen Projekten mit spezifischen und

9 Nicht berücksichtigt sind hierbei allerdings weitere direkt militärische Industriebereiche sowie insbesondere die vielen Zulieferbetriebe anderer Branchen. Versucht man, diese Bereiche zu berücksichtigen, so verdoppeln sich die Beschäftigtenzahlen.

weitreichenden High-Tech-Innovationen; es handelt sich um eine Form staatlicher Politik, die politikwissenschaftlich als "missionsorientierte" Industriepolitik mit einer Konzentration auf wenige, als national wichtig erachtete Ziele bezeichnet wird (Ziegler 1989).¹⁰ Folgt man der vorliegenden Literatur und ihren bekannten Thesen (z.B. Rödel 1972; Halfmann 1984, S. 50 ff.; Kreibich 1986, S. 333 ff.), so läßt sich die Struktur des Systems von Forschung und Entwicklung als eng verschränkter staatlich-militärischer und großindustrieller Komplex kennzeichnen. Im Unterschied zu den in zivilen Industriesektoren der USA vorherrschenden Innovationsbedingungen, die durch eine große, zumeist marktvermittelte Distanz der beteiligten Akteure charakterisiert sind, weist diese wissenschaftlich-militärische Innovationsstruktur einen ausgeprägten Netzwerkcharakter mit dichten, politisch-administrativ vermittelten Kooperationsbeziehungen der beteiligten Akteure auf (Hollingsworth 1991). Sie entstanden im Verlauf des Zweiten Weltkriegs im Rahmen militärischen Großprojekte, die sich auf die Entwicklung der Atombombe und des Radars richteten.

Insbesondere der Ausbau von "big science" war untrennbar mit dieser Entwicklung verbunden. Neben den Forschungslaboratorien großer Industrieunternehmen - besonders bekannt hier etwa die Bell Laboratorien - handelt es sich dabei um Forschungsinstitute und Eliteuniversitäten wie etwa das MIT, an dem neben Fertigungs- und Steuerungstechniken unter anderem Systeme der Nachrichten-, Regelungs- und Steuerungstechniken entwickelt werden, oder die Harvard University und die University of Pennsylvania, die beide als Zentren der Computerentwicklung gelten. Außerdem entstanden die staatlichen wissenschaftlichen Laboratorien wie Lawrence Livermore National Laboratory oder das Laboratory of Los Alamos, die sich hauptsächlich mit der Erforschung und Entwicklung von Kernwaffen befassen, und eine Reihe formal privater Forschungsinstitutionen wie das Stanford Research Institute (SRI) und die MITRE Corporation, die als Ausgründungen von Universitätsinstituten vor allem durch öffentliche Aufträge finanziert werden (Krauch u.a. 1966, S. 177 ff.; Kreibich 1986, S. 337 ff.). Diese und ähnliche Institute erhielten schon im Zweiten Weltkriegs einen großen Anteil staatlicher Fördermittel für

10 Diese Form staatsinterventionistischer Politik läßt sich als faktischer Ersatz einer zivil ausgerichteten Industriepolitik begreifen. Eine Prämisse dieser "nicht unbedingt bewußten Politik" (Junne 1985, S. 29) war daher auch, daß die Förderung militärischer Techniken in jedem Fall zivile "spin offs" nach sich ziehe (Branscomb 1992).

waffentechnische Entwicklungen und bauten anlagen- und geräteintensive Forschungseinrichtungen auf (Noble 1984, S. 11; Halfmann 1984, S. 55). Legitimiert durch den Kalten Krieg führte ab dem Ende der 40er Jahre das Zusammenspiel der Interessen dieser Institutionen an einem Erhalt und einer Weiterführung der Forschungseinrichtungen mit weiteren Interessen zu einem ständigen Ausbau dieser FuE-Strukturen. Neben den genannten Großforschungseinrichtungen handelte es sich dabei um Universitäten, die sich über ihre privaten Finanzierungsquellen hinaus neue Finanzierungsmöglichkeiten erschließen wollten, und um staatlich-militärische Institutionen mit dem Interesse an einer Fortführung der militärischen Großforschung (Melman 1970, S. 261 ff.).

USA		BRD	
1960	64	1962	46
1965	65	1965	41
1970	57	1969	41
1975	51	1975	45
1981	49	1981	41
1985	50	1985	38
1987	46	1987	37
1989	46	1989	35
1990	44	1990	34
Quellen: United States Bureau of the Census: Statistical Abstract of the United States, versch. Jahrgänge; BMFT, versch. Jahrgänge; BMFT: Faktenbericht 1990; eigene Berechnungen			
Tabelle 10	Staatsanteil an FuE insgesamt (in %)		

Zahlenmäßig zeigt sich dies an einem überaus hohen Anteil von staatlicher FuE-Förderung an den Gesamtausgaben für FuE in den USA seit den 50er Jahren. Danach liegt dieser Anteil bis 1975 teilweise deutlich über 50 % (vgl. Tab. 10). Der im weitesten Sinn militärische Anteil an diesen FuE-Mitteln lag in den 60er und 70er Jahren zeitweise bei mehr als drei Viertel aller staatlichen FuE-Ausgaben, während er für die gleiche

Zeit in der Bundesrepublik bei etwas über 20 % liegt (vgl. Tab. 11). Im einzelnen handelt es sich dabei um die Forschungsausgaben des Department of Defense, der Atomenergiekommission (AEC) und der NASA. Durchschnittlich entfielen in den 60er Jahren etwa 20 % dieser Ausgaben auf staatliche Laboratorien, Universitätsinstitute und Forschungszentren. Hauptempfänger dieser Fördermittel ist jedoch die Privatindustrie, auf die durchschnittlich zwei Drittel der staatlichen Fördergelder entfallen. Davon wiederum erhielten die Luft- und Raumfahrtindustrie und die Elektronische Industrie in der Regel einen Anteil von mehr als 80 % (Rödel 1972, S. 135 ff.). In den Maschinenbau hingegen fließt nur ein sehr geringer Anteil dieser staatlichen Fördermittel.

USA*		BRD	
1963/64	83,3	1963	22,7
1970/71	72,6	1971	20,9
1975	63,6	1975	11,1
1981	51,0	1980	10,2
1985	59,0	1985	12,0
1987	70**	1987	21,9
* bis 1975 jeweils für "Defense and Related"; ab 1975 "Defense only"; ** geplanter Wert			
Quellen: Brzoska 1982; OECD nach DiFilippo 1986; OECD 1989; eigene Berechnungen nach BMFT 1990			
Tabelle 11	Militäranteil an staatlichen FuE-Ausgaben 1963 bis 1981 (in %)		

Aufgeschlüsselt nach Branchen wurden, den vorliegenden Zahlen zufolge, die FuE-Aufwendungen im Maschinenbau nur zu einem vergleichsweise geringen und im Zeitablauf deutlich sinkenden Teil zwischen rd. 42 % (1957) und 14 % (1973) durch den Staat finanziert, wohingegen in der Elektro- und Kommunikationstechnischen Industrie - zwischen rd. 67 % (1957) und 49 % (1973) - wie insbesondere in der Luft- und Raumfahrtindustrie - zwischen rd. 88 % (1957) und 78 % (1973) - der weitaus größere Anteil der FuE-Aufwendungen staatlich finanziert wurde (eigene Berechnungen nach NSF 1975, zit. in: Halfmann 1984, S. 143).

Nicht zufällig überwiegen daher insgesamt gesehen die staatlichen FuE-Ausgaben gegenüber industrieeigenen FuE-Aufwendungen. In den USA wird ein größerer Anteil der Industrieforschung durch die Bundesregierung finanziert als in allen anderen großen Industrieländern (Junne 1985, S. 31). Der von der Industrie erbrachte Aufwand für Forschung und Entwicklung ist demgegenüber niedrig; so bleibt er im langjährigen Durchschnitt deutlich hinter dem der Bundesrepublik (wie auch Japans) zurück (Dertouzos et al. 1989, S. 58). Zugleich konzentriert sich der größte Teil der von der Industrie privat aufgebrachten FuE-Mittel in jenen Industriezweigen, die die Hauptempfänger der staatlichen Forschungsmittel sind. Gemessen an den gesamten Eigenmitteln der Industrie bestritt in den 60er Jahren allein die Luft- und Raumfahrtindustrie über ein Drittel, zusammen mit der Elektronikindustrie fast drei Fünftel aller Forschungsausgaben. Der Anteil des Maschinenbaus hingegen war mit durchschnittlich 13 % gering, worin sich unter anderem der oben angeführte unterdurchschnittliche FuE-Aufwand des Werkzeugmaschinenbaus niederschlägt (Rödel 1972, S. 135; Kap. VI, 1.).

2.2 Spezialisierte Entwickler-Anwender-Beziehungen

a) Dominanz der Luft- und Raumfahrtindustrie

Das wachsende industriestrukturelle Gewicht der Luft- und Raumfahrtindustrie hatte zur Folge, daß die Entwicklung rechnergestützter Fertigungstechniken in den USA bis heute dem starken Einfluß der Luft- und Raumfahrtindustrie unterliegt. Etwa ab 1950 stieg die Luft- und Raumfahrtindustrie nach der Automobilindustrie zum zweitgrößten Anwender von Werkzeugmaschinen in der amerikanischen Metallindustrie auf (Noble 1984, S. 9), wobei sich insbesondere der Einsatz komplexer NC-Maschinen - beispielsweise die großen und aufwendigen "skin mills" - von Anbeginn an in diesem Industriezweig konzentrierte.

Über die hohen Einsatzzahlen von NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen hinaus (Tab. 4) wies allein die zivile Luft- und Raumfahrtindustrie ohne ihre Zulieferer in der zweiten Hälfte der 70er Jahre einen Anteil am inländischen Werkzeugmaschinenabsatz von ca. 12 % auf. Hinzuzurechnen sind die militärischen Aufträge dieser Branche für Werkzeugmaschinen, deren Anteil für den gleichen Zeitraum sich auf 6 bis 7 % belaufen dürfte. Der Marktanteil der Automobilindustrie wird hingegen auf 28 bis 30 % geschätzt (CMT 1983, S. 53).

Mehr als es diese globalen Zahlen zeigen, ist diese Branche, sowohl die Flugzeug- und Raketenhersteller als auch ihre großen direkten Zulieferer, ein quantitativ gewichtiger Absatzmarkt für die Werkzeugmaschinen. Ein Experte eines großen NC-Herstellers aus der Elektrotechnischen Industrie umschrieb dieses Absatzfeld mit dem Begriff des "Kernmarktes" für Fertigungstechnik in den USA. Daher konnten die Anwender aus der Luft- und Raumfahrtindustrie vor allem im Zusammenspiel mit einer ganzen Reihe noch genauer zu charakterisierender (s.u.) staatlich-militärischer Förderinstitutionen über ihre Spezifikationen und Anforderungen einen erheblichen Einfluß auf den Verlauf der Technikentwicklung und Technikdiffusion ausüben (Gebhardt, Hatzold 1978, S. 67). Die Spezifikationen liefen, wie am Beispiel der NC-Entwicklung gezeigt, vor allem auf die technische Beherrschung besonders komplexer Fertigungserfordernisse durch den Einsatz weitreichend automatisierter Maschinen und Anlagen hinaus.

Beispielsweise fanden die ab Ende der 60er Jahre entwickelten DNC-Systeme zur Rechnerführung mehrerer NC-Maschinen hauptsächlich in dieser Industriebranche Einsatz. So wird berichtet, daß der Flugzeughersteller McDonnell Douglas beim Einsatz dieser Systeme führend war und sie seit Beginn der 70er Jahre ständig ausbaute. Gegen Ende der 70er Jahre wurden solche Systeme als "Herzstücke" in der Fertigung angesehen (Bluestone et al. 1981, S. 117 f.).

Die Anwender aus der Luft- und Raumfahrtindustrie bauten überaus enge und über Marktmacht und Know-how-Vorsprung dominierte Beziehungen zu einzelnen, zumeist größeren Herstellern aus dem Werkzeugmaschinenbau auf, um dadurch die Nutzung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und Technologien für die Entwicklung spezifischer Fertigungstechniken sicherzustellen; diese anwenderdominierten Beziehungen hatten sich entweder schon im Verlauf der Entwicklung konventionell gesteuerter komplexer Maschinensysteme in den späten 40er Jahren etabliert oder sie entstanden im Verlauf der NC-Entwicklung und weiterer darauf basierender Fertigungstechniken wie etwa flexible Fertigungssysteme (CMT 1983, S. 69 ff.; Reintjes 1991, S. 155 f.). Der Einfluß dieser Branche schlug daher unmittelbar auf die Produktstrategien der großen Werkzeugmaschinenhersteller, teilweise über diese vermittelt auch auf die Hersteller von Steuerungskomponenten aus der Elektrotechnischen Industrie durch. Darüber hinaus wurden auch, für die Industrie der USA weitgehend untypisch, enge Kooperationsbeziehungen zwischen vielen Anwenderbetrieben des Militärssektors und FuE-Institutionen aufgebaut (CMT 1983, S.

71); besonders deutlich zeigte sich dies, wie beschrieben (Kap. IV, 1.), bei der ersten Phase der Entwicklung der Programmiersprache APT, an der neun Flugzeughersteller, IBM und das MIT teilnahmen (Reintjes 1991, S. 85). Vermittelnde Instanz war dabei häufig, wie schon erwähnt, die Aircraft Industries Association (AIA), die - gestützt durch staatlich-militärische Förderprogramme - die Interessen der Großbetriebe aus dieser Branche bündelte und damit ihren Einfluß auf die Entwicklungs- und Produktionsentscheidungen der Hersteller vergrößerte (March et al. 1989, S. 21 f.).¹¹

Die Anwenderinteressen der Luft- und Raumfahrtindustrie an hoher technischer Komplexität und weitreichender Automatisierung der fertigungstechnischen Systeme lassen sich in erster Linie auf ihre schon angeführten besonderen technischen Fertigungsprobleme zurückführen (Kap. IV, 1.), die nur mit Hilfe aufwendiger und weitgehend automatisierter Computer- und Steuerungssysteme zu lösen waren: Die in der Flugzeugindustrie häufige Fräsbearbeitung sphärisch gekrümmter Flächen erforderte den Einsatz komplizierter und früher sehr teurer Bahnsteuerungen; die Kosten für Vorrichtungen und sonstige Betriebsmittel und die Umrüstzeiten drohten enorm zu steigen; die Anfertigung von Schablonen für die bis dahin verwendeten konventionellen Werkzeugmaschinen wurde zunehmend schwieriger und überforderte insbesondere den Werkzeug- und Formenbau mit seinem in den USA nur begrenzten Qualifikationspotential. Ähnliche Probleme traten später in Konstruktionsbereichen auf, wo aufwendige, auf die Beherrschung komplexer geometrischer Teilekonturen gerichtete CAD-Systeme erforderlich wurden, um den wachsenden Konstruktionsaufwand in Grenzen zu halten (König u.a. 1990). Außerdem begründete sich dieses Anwenderinteresse besonders in den spezifischen Konkurrenzverhältnissen der Rüstungsindustrie, die weniger über niedrige Preise und eine kostenminimale Produktion als vielmehr über den Nachweis hoher technischer Kompetenz gegenüber den staatlichen Auftraggebern ausgetragen wird; die Beherrschung komplex automatisierter

11 Die Aircraft Industries Association, später Aerospace Industries Association, hat eine ca. 70jährige Geschichte. 1917 wurde die Vorläuferorganisation Aircraft Manufacturers Association gegründet, deren Politik sich bis zu Beginn des Zweiten Weltkriegs allerdings nur auf eine generelle Interessenvertretung gegenüber staatlichen Stellen richtete. Erst ab Mitte der 40er Jahre, mit dem Wandel der Fertigungsbedingungen der Luftfahrtindustrie, griff sie gezielt auch Fragen der technischen Entwicklung auf (Reintjes 1991, S. 83).

Fertigungstechniken war schon immer hierfür ein geeigneter Beleg (Melman 1974, S. 35).¹²

Schließlich ist das Interesse an der Entwicklung von Maschinen- und Anlagenkonzepten weitreichender Automatisierung in Zusammenhang mit den spezifischen organisatorischen und personellen Fertigungsproblemen der Luft- und Raumfahrtindustrie zu sehen. Geschaffen werden sollte eine Form der Informationsverarbeitung und Datenspeicherung, die unabhängig von menschlichen Eingriffen die Transferierbarkeit wichtiger Daten zwischen geografisch weit auseinanderliegenden Fertigungsbetrieben ermöglichte; die Lochstreifen der NC-Steuerungen waren hierfür die Voraussetzung (Noble 1984, S. 203 ff.). Darüber hinaus stellte die ungenügende Qualifikation der Fertigungsbelegschaften ein Dauerproblem dieses Industriezweiges dar, obgleich die Arbeitskräfte in der Luft- und Raumfahrtindustrie im Vergleich zur übrigen Metallindustrie der Vereinigten Staaten als "skilled" gelten (Bluestone et al. 1981, S. 3). Dies zeigte sich schon zu Beginn der 50er Jahre, als die Entwicklung neuer Flugzeugtypen die Betriebe mit neuartigen, nur schwer beherrschbaren Bearbeitungsanforderungen konfrontierte und sich fertigungstechnische Konzepte, die auf steigende Eigenfähigkeit der technischen Anlagen hinausliefen, geradezu aufdrängten (Hough 1975, S. 351). Dabei spielten besonders auch die speziellen Probleme des Werkzeug- und Formbaus, einer wichtigen Zulieferbranche der Luftfahrtindustrie, eine drängende Rolle, die aufgrund eines nur begrenzten und erodierenden Reservoirs an qualifizierten Arbeitskräften immer weniger in der Lage war, für die konventionelle Bearbeitung der neuen Teile qualitativ und quantitativ ausreichend Schablonen kostengünstig herzustellen.¹³

Diese Personal- und Qualifikationsprobleme verschärften sich im Verlauf der 60er und 70er Jahre, als der bis dahin noch verfügbare, vor allem auf staatlich finanzierte Qualifizierungsmaßnahmen des Zweiten Weltkriegs zurückgehende Bestand an "skilled aircraft workers" aus Altersgründen

12 Aufgrund dieser Zusammenhänge finden sich auch in dieser Branche, ganz im Unterschied zu wesentlichen Teilen der übrigen US-Industrie, eher langfristig und technisch ausgerichtete Investitionsstrategien (Dertouzos et al. 1989, S. 66).

13 Diesen Aspekt betonte Parsons mehrmals ausdrücklich im Interview. Danach war dies ein überaus wichtiger Anlaß für die von der Air Force forcierte Entwicklung der NC-Technik.

sich allmählich verringerte und die Betriebe bis dahin kaum Ausbildungsanstrengungen zur Kompensation dieser sich verschärfenden Qualifikationslücke unternommen hatten. Dramatisch spitzte sich diese Situation offensichtlich Mitte der 70er Jahre zu, als in der Phase eines Konjunkturaufschwungs und einem schnell wachsenden Bedarf an qualifizierten Produktionsarbeitern der bis dahin noch vorhandene Bestand solcher Arbeitskräfte "almost overnight" verschwand (Bluestone et al. 1981, S. 129 f.).¹⁴ Die Unternehmen reagierten auf diese Situation mit der Ausweitung vorbereitender und planender Funktionen, die sich in der beständigen Zunahme von Ingenieuren und Technikern an der Gesamtbelegschaft von Betrieben dieser Industrie ausdrückt. Eine weitere Reaktion war der verstärkte Einsatz komplexer, rechnergestützter Fertigungssysteme, die den Bedarf an qualifizierten Produktionsarbeitern reduzierten (ebd., S. 135 ff.).

Eine wichtige Voraussetzung dafür, daß sich die Anwenderinteressen an ambitionierten und komplexen technischen Systemlösungen, wie der Fall der NC-Entwicklung zeigt, weitgehend ungebremst durchsetzen konnten, ist ohne Frage der Umstand, daß ökonomische Kriterien und Kostenüberlegungen bei den Großanwendern aus der Luft- und Raumfahrtindustrie, wie generell in der Militärindustrie, so gut wie keine Rolle spielten; der politische und militärische Interessen garantierte Absatz und vor allem die bei militärischen Beschaffungsaufträgen üblichen "cost-plus"-Verträge erlaubten weite Spielräume für steigende Kosten.

Durch diese Vertragsformen sollen die ex ante nicht genau kalkulierbaren Kosten der Industrie aufgefangen werden. In verschiedenen Vertragsvarianten werden darüber hinaus die Profite garantiert. In der Variante des "cost-plus-percentage-profit" garantieren sie in Abhängigkeit von der Höhe der Kosten einen bestimmten Gewinnanteil, wodurch die Rüstungsunternehmen zu ständigen Kostensteigerungen veranlaßt wurden. Demgegenüber wird in der Variante des "cost-plus-fixed-fee" ein in seiner Höhe festliegender Profit durch das Department of Defense garantiert. Obgleich diese Vertragsformen seit Jahrzehnten politisch umstritten sind und von verschiedenen Regierungen abgeschafft werden sollten, bestimmen sie nach wie vor die "contracting procedures" zwischen dem Department of Defense und der Luft- und Raumfahrtindustrie (Bluestone et al. 1981, S. 163 f.).

14 Die Ende der 80er Jahre bekannt gewordenen massiven Qualitätsprobleme in der zivilen Flugzeugfertigung von Boeing gehen vermutlich ebenfalls auf Qualifikationsdefizite zurück.

Anwenderbetriebe aus den marktorientierten Industriebereichen der Massenproduktion entwickelten hingegen nur allmählich ein Interesse an EDV-gestützten Fertigungstechniken. Wie die Produktions- und Verbreitungszahlen zeigen (Tab. 1, 2), fand die NC-Technik erst ab den späten 60er, in größerem Umfang aber erst ab Ende der 70er Jahre breitere Verwendung in der Automobilindustrie, Elektrotechnischen Industrie, der Landmaschinenindustrie oder dem allgemeinen Maschinenbau. Zumeist handelte es sich dabei um Großbetriebe, während mittlere und vor allem kleinere Betriebe der Metallverarbeitenden Industrie, so übereinstimmend die interviewten NC-Experten in den USA, erst in den 80er Jahren ein wachsendes Interesse am Einsatz rechnergestützter Fertigungstechniken zeigten (Kap. VIII). Allenfalls fanden sich, wie angeführt, einige wenige NC-gesteuerte Werkzeugmaschinen schon relativ früh im zivilen Werkzeug- und Formenbau, wobei es sich dabei wohl eher um Zweigwerke von Konzernen als um die vielen unabhängigen Kleinbetriebe dieser Branche handelte.

Zwar erweisen sich für die Großbetriebe der Massenproduktion die militärisch ausgerichteten Systeme unter den Bedingungen einer Zivilproduktion als kostspielig und kompliziert (Herrigel 1988, S. 17 ff.; Thurow 1987), jedoch traf das damit verbundene Konzept einer weitreichenden Automatisierung durchaus auf ihr Anwendungsinteresse und auf ihre drängenden Anwendungsprobleme. Denn damit wurde eine Technik bereitgestellt, die aufgrund der damit verbundenen konsequenten Trennung von Disposition und Ausführung und einer Entwertung ausführender Arbeit den vorherrschenden arbeitsorganisatorisch rigiden Strukturen weitgehend entsprach und daher relativ problemlos eingesetzt werden konnte. Ungeplanter Effekt dieser Entwicklung war die Steigerung der Kontrollierbarkeit von Arbeitsprozessen, die mit den skizzierten Kontrollinteressen maßgeblicher Entwicklergruppen und denen des Managements in Anwenderbetrieben konvergierte.¹⁵

15 Insofern greift, wie einleitend schon diskutiert (Kap. I), Nobles herrschaftssoziologische Interpretation der NC-Entwicklung zu kurz. Die Kontrollinteressen des Managements und der Ingenieure waren keine primären und sich intentional durchsetzenden Antriebskräfte der NC-Entwicklung, sondern erst im nachhinein erwies sich diese Technik unter den spezifischen betriebs- und industriestrukturellen Bedingungen der USA als günstig.

b) Entwicklerkonstellation: Verbund aus Big Science, Militär und Großbetrieben

Die Entwicklerkonstellation des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters kann als ein enger Verbund relativ marktferner, mächtiger Akteure mit einigen wenigen industriellen Großherstellern charakterisiert werden. Es spiegelt sich in ihm jene, staatlich-militärisch initiierte und auf Dauer gestellte Struktur von "big science" des amerikanischen FuE-Systems wider, die sich im Zuge der anwachsenden staatsinterventionistischen Politik herausbildet (Kap. VIII, 1.). Wie nicht nur die Entwicklungsgeschichte der NC-Technik, sondern die Entwicklung weiterer EDV-gestützter Fertigungstechniken zeigen, ist für die fertigungstechnische Entwicklung das Zusammenspiel staatlich-militärischer Auftraggeber mit einigen universitären und wissenschaftlichen Instituten und Forschungslaboratorien der Natur- und Computerwissenschaften und wenigen Großbetrieben aus der Elektrotechnischen Industrie und dem Werkzeugmaschinenbau konstitutiv. Im Rahmen dieser Konstellation wurden die für die Entwicklung rechnerbasierter Fertigungstechniken erforderlichen Ressourcen bereitgestellt, über die die Industrie allein, insbesondere der Werkzeugmaschinenbau, nicht verfügten.

So spiegelt die Zusammensetzung einer Ende der 70er Jahre gegründeten "Machine Tool Task Force", die die Situation der amerikanischen Werkzeugmaschinenentwicklung evaluieren und Entwicklungsempfehlungen geben sollte, präzise diese Entwicklerkonstellation wider: Ins Leben gerufen wurde die Arbeitsgruppe von der Manufacturing Technology Advisory Group des Department of Defense und Vertretern des Lawrence Livermore National Laboratory, die bis dahin mehr mit Kernenergie als mit Fertigungstechnik befaßt waren. Finanziert wurde die Arbeit vom Materials Laboratory der US-Air Force, die Mitglieder der Arbeitsgruppe stammten zum überwiegenden Teil von großen wissenschaftlichen Instituten, Großbetrieben des Werkzeugmaschinenbaus, der Elektrotechnischen Industrie sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie und von militärischen Institutionen (AM, Oktober 1980, S. 105 ff.). Mithin waren in der Arbeitsgruppe alle jene Institutionen und Akteure vertreten, die über 30 Jahre die Entwicklung der Fertigungstechnik wesentlich bestimmten und nun diese evaluieren sollten.

Der militärisch-staatliche Einfluß setzte sich vor allem über verschiedene vom Verteidigungsministerium finanzierte Investitions- und Entwicklungsprogramme durch. Sie richteten sich primär auf die Herstellung der fertigungstechnischen Basis der direkten Auftragnehmer (prime contractors) des Department of Defense. Faktisch übte das Department of Defense damit einen direkten und weitreichenden Einfluß auf die gesamte

fertigungstechnische Entwicklung aus. Mit den Entwicklungsprogrammen des Verteidigungsministeriums wurden nicht nur die NC-Technik, sondern in den 60er Jahren auch CAD- und CAD/CAM-Techniken direkt gefördert (König u.a. 1990). Ab Mitte der 70er Jahre umfaßten verschiedene, breit angelegte Förderprogramme die weitergehende Entwicklung mathematischer und computertechnologischer Grundlagen zur Modellierung und Strukturierung von Produktionsprozessen vornehmlich in der Luft- und Raumfahrtindustrie sowie die Entwicklung rechnerintegrierter Fertigungssysteme.

Seit Beginn der 50er Jahre existieren die "Man-Tech"-Programme (Manufacturing Technology) des Department of Defense, die sich auf die Entwicklung und Anwendung neuer Fertigungstechniken im weitesten Sinn richten. So wurden beispielsweise 1984 für dieses Programm rd. 200 Mio. \$ bereitgestellt (Jünne 1985).¹⁶

Innerhalb dieses Gesamtprogramms gibt es eine ganze Reihe von Einzelprogrammen, die sehr unterschiedliche Entwicklungs- und Anwendungsfelder von chemischen Prozessen bis zur Automatisierung des Schiffbaus umfassen (CMT 1983, S. 52 ff.). Bei metallverarbeitenden Techniken war ein Resultat dieser Programme die NC-Technik. Später wurden beispielsweise auch die Entwicklung des Schweißens durch Laser und die Entwicklung flexibler Fertigungssysteme gefördert. In diesem Rahmen wurde in den 60er Jahren das AFCAM-Programm (Air Force Computer Aided Manufacturing) zur CAD-Entwicklung aufgelegt.

Davon zu unterscheiden ist das ICAM-Programm der Air Force (Integrated Computer Aided Manufacturing Program), das 1975 aufgelegt und seit 1977 vom Air Force Systems Command, Wright-Patterson Base (Dayton/OH) administriert wird. Ausgestattet mit Fördergeldern in Höhe von rd. 100 Mio. \$, sollte vor allem in den 70er Jahren der Versuch unternommen werden, NC-Maschinen in der Werkstatt mit den Computersystemen in den Konstruktions- und Planungsbereichen zu vernetzen. Beteiligt waren an diesem Programm über 70 wissenschaftliche und industrielle Auftragnehmer, so etwa Unternehmen aus der Luft- und Raumfahrtindustrie, aber auch Software-Hersteller. Ziel der Entwicklungsanstrengungen war unter anderem, die stark gestiegenen Kosten der Konstruktions- und Planungsbereiche in Betrieben der Luft- und Raumfahrtindustrie durch die Entwicklung von CAD/CAM-Systemen (Computer Aided Design und Manufacturing) zu begrenzen. Die Entwicklung der ersten Konzepte des Computer Integrated Manufacturing (CIM) geht auf dieses Programm zurück. Daneben ging es in dem Programm um die Entwicklung von systemübergreifenden Programmsprachen und von Handhabungsgeräten (Harrington 1984; Noble 1984, S. 330 ff.). Vorliegenden Informationen zufolge wurde dieses Programm in den 80er Jahren fortgeführt und auf die Computervernetzung auch bei den kleineren Zulieferbe-

16 Genauere Angaben über den finanziellen Umfang des genannten Programms waren nicht zu ermitteln.

trieben der "prime contractors" des Department of Defense ausgedehnt (VDI 1986, S. 125 f.).

In den 80er Jahren wurde schließlich das "Man-science"-Programm der Air Force aufgelegt, das sich auf die Realisierung einer vollautomatischen Metallbearbeitung richtete. So wurde Ende der 80er Jahre in einem Forschungsverbund des Robotics Institutes der Carnegie Mellon University in Pittsburgh, des Triebwerkherstellers Pratt and Whitney und des Werkzeugmaschinenherstellers Cincinnati Milacron die vollautomatische Bearbeitung einer Triebwerkhalterung erprobt (Manufacturing Engineering, Juli 1989, S. 32).

Die Investitionsförderprogramme richteten sich seit Anfang der 50er Jahre auf die Beeinflussung der Investitionspolitik der direkten Auftragnehmer des Department of Defense, um auf diese Weise die Anschaffung von Fertigungstechniken zu fördern, die im militärischen Interesse liegende Spezifikationen und Leistungsmerkmale aufweisen. Typische Beispiele hierfür sind die schon angeführte Finanzierung von 105 NC-gesteuerten Fräsmaschinen für die Luftfahrtindustrie Mitte der 50er Jahre durch die Air Force, womit ein Absatzmarkt für diese neue Technik überhaupt erst geschaffen wurde (Noble 1984, S. 201), oder ab Beginn der 70er Jahre die Förderung des Einsatzes flexibler Fertigungssysteme.

Die Investitionspolitik der unmittelbaren Lieferanten des Department of Defense wird bis heute durch die Tech-Mod-Programme (Technology Modernization) gefördert. Ein Ziel dieses Programms ist die Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen den Hauptvertragsnehmern des Department of Defense und ihren Zulieferbetrieben, um die Produktivität der Waffenherstellung zu verbessern. Ein Unterprogramm ist beispielsweise das IPI-Programm (Industrial Productivity Improvement), das im Zusammenhang mit der Entwicklung und Produktion eines neuen Militärflugzeuges in der zweiten Hälfte der 70er Jahre aufgelegt wurde (CMT 1983, S. 56 ff.).

Über das Zustandekommen dieser Programme kann nur wenig gesagt werden: Dem vorliegenden Material zufolge (ebd., S. 56 ff.; Reintjes 1991, S. 134 ff.) ging der primäre Anstoß insbesondere für die Förderprogramme der Investitionen vom Department of Defense genauer: von für die militärische Beschaffung zuständigen Instanzen der einzelnen Teilmittlungen des Militärs aus; bei der Air Force spielten dabei beispielsweise das Air Material Command (AMC) und seine Manufacturing Technology Division, die teilweise mit Militärs, teilweise mit zivilen Ingenieuren besetzt war, eine entscheidende Rolle. Die konkrete Auslegung der Programme wurde dann - so steht zu vermuten - in engen Abstimmungsprozessen zwischen Großherstellern aus dem Werkzeugmaschinenbau und

den prime contractors, d.h. Unternehmen der Luft- und Raumfahrtindustrie, sowie Vertretern von Industrieverbänden vorgenommen.

Obgleich sich die Programme formell an die gesamte Metallverarbeitende Industrie richten, ging bislang der überwiegende Teil der Fördergelder an die Hauptvertragsnehmer des Department of Defense. Allen vorliegenden Informationen zufolge partizipierten insbesondere Werkzeugmaschinenhersteller nur selten direkt, zumeist nur indirekt an den Programmen. Häufig gingen Subkontrakte an jene größeren Werkzeugmaschinenhersteller, die über enge Beziehungen zu den Betrieben der Rüstungsindustrie verfügten. Die Masse der häufig kleineren Werkzeugmaschinenhersteller ging in der Regel jedoch leer aus (CMT 1983, S. 58 f.).

Unmittelbar in den Prozeß der fertigungstechnischen Entwicklung ist eine Reihe wissenschaftlicher Institute eingebunden, deren Forschungsschwerpunkte grundlegende Arbeiten zur Entwicklung von Informatik, Computer- und Steuerungstechnologien sind. Neben Einrichtungen wie dem Illinois Institute of Technology, Instituten der Perdue University oder verschiedenen Institutionen in Kalifornien spielt insbesondere das MIT mit seinen verschiedenen Laboratorien eine hervorragende Rolle (Melman 1970, S. 261 ff.). Diese und weitere wissenschaftliche Institutionen waren direkte Auftragnehmer der militärisch finanzierten Entwicklungsprogramme, und es entstanden im Verlauf verschiedener technischer Entwicklungsprojekte zunehmend auch Kooperationsbeziehungen mit industriellen Entwicklern, insbesondere zur Computerbranche. Ein Beispiel hierfür ist die Zusammenarbeit zwischen dem MIT und den Rechnerherstellern IBM und Digital Equipment, die im Zuge der militärisch geförderten CAD-Entwicklung, die hauptsächlich in den 60er Jahren am MIT durchgeführt wurde, zustandekamen (Reintjes 1991, S. 100 ff.).

Seitens der Industrie sind zumeist nur einzelne und vor allem große Industriebetriebe im Rahmen dieses Innovationsmusters an der Technikentwicklung maßgeblich beteiligt. Vielfach handelte es sich dabei um große Werkzeugmaschinenbetriebe wie Giddings & Lewis, Ingersoll und Cincinnati Milacron und Hersteller von Steuerungs- und Elektronikgeräten wie General Electric, Bunker Ramo oder auch IBM (Ong 1983; Noble 1984). Die großen Werkzeugmaschinenhersteller waren einerseits in der Lage, eigene FuE-Ressourcen im Bereich der Elektronik- und Computeranwendung aufzubauen, andererseits waren sie nicht zuletzt aus diesem Grund in

der Lage, sich in den Prozeß der militärisch orientierten und geförderten Technikentwicklung einzuklinken. Um sich das notwendige Know-how zu verschaffen, knüpften die Werkzeugmaschinenhersteller auch zeitweise enge FuE-Verbindungen direkt zu den Steuerungs- und Elektronikherstellern. Wie erwähnt (Kap. IV, 1.), wurden die ersten NC-Steuerungen für die Luftfahrtindustrie in der zweiten Hälfte der 50er Jahren in der Regel von solchen Konsortien entwickelt. Typisches Beispiel ist die Zusammenarbeit des Werkzeugmaschinenherstellers Kearney and Trecker mit dem Elektronikunternehmen Bendix (Reintjes 1991, S. 157 ff.).¹⁷

2.3 Wissenschaftliche Strukturierung des technischen Personals

a) Anwendungsfernes Entwicklungspersonal

Das die Entwicklung rechnergestützter Fertigungstechniken tragende technische Personal ist in seiner überwiegenden Mehrheit primär wissenschaftlich und nicht industriell-anwendungspraktisch orientiert. Nach allen vorliegenden Informationen spielten insbesondere Computerfachleute, Elektroingenieure und Ingenieure mit einem theoretisch ausgerichteten Maschinenbaustudium (Mechanical Engineers) mit einer zumeist sechsjährigen Ausbildung bei der Entwicklung moderner Fertigungstechniken in den USA eine dominierende Rolle. Diese Gruppen des höheren technischen Personals finden sich in den wissenschaftlichen Instituten, den Elektrotechnischen Unternehmen wie auch in Großbetrieben des Werkzeugmaschinenbaus, nicht aber in den vielen kleineren und mittleren Betrieben dieser Branche (Perucci 1971, S. 500). Eine eher nachgeordnete Rolle spielten demgegenüber praktisch orientierte Fertigungsingenieure (Manufacturing Engineers), die spätestens seit der Nachkriegszeit nach Status und Berufsverläufen deutlich von der weit größeren Gruppe der wissenschaftlich orientierten "Engineers" zu unterscheiden sind.

17 Verbände spielten in diesem Zusammenhang keine nennenswerte Rolle. Zwar existierten seit den 60er Jahren z.B. die Numerical Control Society und die Computer Automated Systems Association (CASA) der Society of Manufacturing Engineering (SME), doch beschränkten sich deren Aktivitäten in der Regel auf Schulungs- und Informationsveranstaltungen (Reintjes 1991, S. 163 f.).

Die Mehrzahl dieser Entwicklungsingenieure arbeitet relativ abgeschottet von Fertigungsproblemen und betrieblichen Fertigungsbereichen. Dies gilt nicht nur für die ohnehin fertigungsfernen FuE-Institute, sondern ebenso für die beteiligten industriellen Entwickler. Übereinstimmender Auskunft von interviewten Experten und vorliegender Literatur zufolge besteht in den Großbetrieben des Werkzeugmaschinenbaus in der Regel eine tiefgehende Trennung zwischen Konstruktion und Entwicklung einerseits und Fertigung und Vertrieb andererseits. Danach kennt der typische Entwicklungs- und Entwurfsingenieur seine Kollegen aus den Fertigungsbereichen so gut wie nicht, und es existieren so gut wie keine kooperativen Bezüge zwischen beiden Gruppen des technischen Personals. Besonders eingängig wird dieses Verhältnis durch die Formulierung beschrieben, daß konstruktive Entwürfe nicht selten aus dem Konstruktionsbüro "over the wall" in die Fertigung geworfen würden und praktische Fertigungserfordernisse in den Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses kaum Berücksichtigung finden (Dean, Susman 1989, S. 28).

Diese deutliche Separierung großbetrieblicher und wissenschaftlicher FuE-Bereiche wird gestützt und verstärkt durch anwendungsferne Berufsverläufe dieser Ingenieurgruppe. Vorherrschend sind insbesondere bei den Großbetrieben "Seiteneinstieg" und große Distanz zur Fertigung. Bei den wissenschaftlichen Instituten ist der interne Aufstieg die Regel. Personeller Austausch mit dem Maschinenbau, wie in Deutschland üblich, findet sich so gut wie nicht, sondern vornehmlich mit der Computer- und Elektronikindustrie und mit der sich in den 70er und 80er Jahren entwickelnden Software-Industrie; typisches Beispiel hierfür sind die Berufsverläufe wichtiger, an der NC-Entwicklung beteiligter Wissenschaftler des MIT, die in den 60er und 70er Jahren zusammen mit weiteren Wissenschaftlern Software-Häuser gründeten (Reintjes 1991, S. 152 f.).

Kennzeichnend ist, daß die Mehrheit dieser Ingenieure und Wissenschaftler von vorneherein versucht, fertigungsnahe Jobs zu vermeiden. Nicht selten wird das Desinteresse und die elitäre Haltung von Ingenieuren gegenüber Problemen der Werkstatt beklagt (March et al. 1989, S. 27 f.; OTA 1990, S. 25). Der Aufstieg ins Management oder in separate FuE-Bereiche und wissenschaftliche Institutionen ist vorherrschende Karriereorientierung, wobei ein längeres Verweilen in fertigungsnahen Bereichen als eher hinderlich für eine solche Karriere gilt (Hayes, Abernathy 1980; Fischer 1983). Diese Karriereverläufe finden sich auch bei solchen

Ingenieurgruppen, wie etwa den Manufacturing Engineers, die von ihrer Ausbildung her Fertigungsproblemen relativ nahe stehen. Der Status von Fertigungsingenieuren und Technikern ist gering, in wissenschaftlichen wie auch industriellen Bereichen tragen sie das "Stigma", nur wenig gebildet zu sein (Dean, Susman 1989, S. 28). Wie ein Experte meinte, könnten Fertigungsingenieure bestenfalls im mittleren Management "Chief Technical Officer" werden, während ihnen anspruchsvollere Konstruktions- oder Entwicklungstätigkeiten oder gar Positionen im oberen Management in der Regel verschlossen blieben.

b) Auf "Spitzenleistungen" gerichtete Entwicklungsziele

Daß technische Neuentwicklungen zunächst primär auf wissenschaftliche Qualifikationen und Forschungs-Know-how angewiesen sind, unterscheidet die amerikanische NC-Entwicklung nicht von der in der Bundesrepublik wie von anderen innovativen Entwicklungsprozessen. Entscheidend für die amerikanische Situation war die finanzielle Unterstützung der Entwicklungsvorhaben durch das Militär. Sie erst eröffnete den Spielraum für die professionellen Interessen der Entwicklungsingenieure und Informatiker, die nie etwas mit den praktischen der Fertigung im Werkzeugmaschinenbau zu tun gehabt hatten und an einer weitgehenden Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in Technik interessiert waren; es mußte kein Kompromiß mit ökonomischen Restriktionen erfolgen, sondern gefragt waren "Frontforschung" und "Spitzenleistungen". Aus seiner Sicht als Betriebspraktiker bezeichnete deshalb John T. Parsons das ICAM-Technologieprogramm der Air Force, das sich ohne Rücksicht auf Kriterien der Wirtschaftlichkeit einzig an Anforderungen technischer Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit orientierte, als "a monstrous technological boondoggle".

Die Interessen der theoretisch ausgebildeten Ingenieure und Wissenschaftler korrespondierten zudem mit den Bestandsinteressen der großen Forschungsinstitute. Sie zielten, wie die erfolgreiche Fortführung des MIT-Computerprojekts "Whirlwind" im Rahmen der NC-Entwicklung zeigte, auf eine kontinuierliche Nutzung und Ausweitung der Laboranlagen und des akkumulierten Know-hows, worüber Forschungsprioritäten und neue Forschungsfelder erzeugt wurden; "Forschungsziele lassen sich mit bestimmten Dimensionierungen der benötigten Apparate gleichsetzen"

(Rödel 1972, S. 125). Die Interessen der Forschungsinstitute konvergierten überdies mit denen der Großunternehmen aus der Luft- und Raumfahrtindustrie. Sie basierten auf ähnlichen Bedingungen ihrer internen Strukturen und zielten in eine vergleichbare Richtung des FuE-Prozesses. Sie orientierten sich an ihrem vorhandenen wissenschaftlichen und technischen Personal und ihren spezialisierten Produktionskapazitäten und hatten ein Interesse an der Fortentwicklung einer hoch spezialisierten Technik; der Erhalt dieser internen Strukturen hatte in der Regel Priorität vor einer Politik technischer Innovationen, die etwa aufgrund industriell- oder marktbezogener Entwicklungskriterien strukturverändernde Umstellungs- und Anpassungsmaßnahmen erforderlich gemacht hätten.

Die gleichgerichteten, aber von der Fertigungspraxis abgehobenen Interessen machen es plausibel, daß allgemeine Theorien der Informationsverarbeitung und mathematisch abgeleitete Modelle von Produktionsprozessen und im militärischen Zusammenhang entwickelte Regelungs- und Steuerungstechnologien als Lösungspotentiale für Fertigungsprobleme herangezogen wurden. Zielsetzung wurden ihre konsequente "Elektronisierung", die Substituierung personell auszuführender Steuerungs- und Überwachungsarbeit durch mathematisierte Prozeßmodelle, die Simulation produktionstechnischer Zusammenhänge und die Automation der realen Abläufe (Halfmann 1984). Folgt man Noble (1979, S. 28 ff.), so spielten dabei eine "Ideologie der Technik" und die damit verschränkte "Ideologie der Kontrolle" eine maßgebliche Rolle, deren Ziele sich auf "mathematische Eleganz" einer technischen Lösung, Kalkulierbarkeit, Fließproduktion, Fernsteuerung und automatische Fabrik richteten.¹⁸ Nicht zufällig sind in den USA spezielle, etwa auf den Entwurf und die Auslegung von Werkzeugmaschinen gerichtete Regeln und Methoden, wie sie in der Bundesrepublik in dem ingenieurwissenschaftlichen Fachgebiet Konstruktionslehre zusammengefaßt sind, wenig entwickelt (König u.a. 1990); Konstruktionslehre befaßt sich in den USA eher mit Fragen der Anwendung von Hardware und Software als mit Problemen der Maschinenkonstruktion (Moritz 1993).

18 Mit dieser spezifisch amerikanischen Form der Verwissenschaftlichung fertigungstechnischer Entwicklung verbindet sich daher, wie der amerikanische Entwicklungspfad der NC-Technik zeigt, unmittelbar die Entwertung und Dequalifizierung von Produktionsarbeit (Kap. II, 4.).

Diese Entwicklungsziele bestimmen bis heute den Hauptpfad fertigungstechnischer Entwicklung in den USA. Wie die NC-Entwicklung zeigte, richteten sich in einer ersten Phase die Entwicklungsanstrengungen auf die Automatisierung der direkten Steuerungsfunktionen von Werkzeugmaschinen. Es ging dabei um die weitere Vereinfachung von Produktionsarbeit und ihre fortschreitende Reduktion auf nur mehr rein ausführende Funktionen. Die dabei verfolgten Ziele hoher Komplexität und Automatisierung hatten, wie beschrieben, für die gesamte fertigungstechnische Entwicklung in den USA eine bestimmende Leitbildfunktion (Reintjes 1991, S. 177). In einer weiteren Phase wurde dann versucht, auch die technisch-geistige Arbeit in den der Werkstatt vorgelagerten Bereichen der Planung, Vorbereitung und Konstruktion einem forcierten Technikeinsatz und einer Automatisierung zugänglich zu machen. Diese Entwicklung begann in der ersten Hälfte der 60er Jahre. Der erste Schritt in diese Richtung war der Entwurf von Systemen rechnergestützter Konstruktion (CAD: Computer Aided Design), die aus der NC-Programmiersprache APT abgeleitet wurden (Reintjes 1991, S. 93 ff.). Folgende Entwicklungsschritte waren die schon erwähnten DNC-Systeme zur Rechnerdirektführung mehrerer NC-Werkzeugmaschinen und ihre Vernetzung mit CAD zu CAD/CAM-Systemen (Kap. IV, 1.). Schließlich wurde die computertechnische Verknüpfung möglichst aller betrieblichen Funktionen Entwicklungsziel, um über einen dadurch fehlerfreien Informations- und Datentransfer die Kontinuität und Störungsfreiheit der automatisierten Teilfunktionen weiter zu steigern. Diese Versuche mündeten in den schon Anfang der 70er Jahre in den USA begründeten Konzepten des Computer Integrated Manufacturing (Harrington 1973).

c) **Schulische Reproduktion des technischen Personals¹⁹**

Der Einfluß von Informatikern und wissenschaftlich orientierten Ingenieuren auf die Prozesse von Technikentwicklung und der nachgeordnete Status produktions- und fertigungserfahrenen Personals, insbesondere von

19 Im Unterschied zu einem als "beruflich-praktisch" zu kennzeichnenden Reproduktionsmuster des technischen Personals sind Lutz und Veltz zufolge die Merkmale des Typs "schulischer" Reproduktion (a) der Kompetenzerwerb in vom Produktionsprozeß "gesonderten" Lernprozessen und (b) die Kompatibilität von schulischen Abschlüssen und der Zugehörigkeit zum technischen Personal (1989, S. 239 f.).

fertigungstechnisch ausgebildeten Ingenieuren, verweist auf hohe Divergenzen im Verhältnis von theoretisch und praktisch ausgebildetem technischen Personal in den USA.²⁰ Diese Differenzierung reicht in den USA historisch weit zurück und setzt sich in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg verstärkt fort.

Spätestens seit Beginn dieses Jahrhunderts setzte in der Ausbildung von Mechanical Engineers ein Prozeß der Abgrenzung gegenüber der "shop culture" ein, der von den universitären Ausbildungsinstitutionen vorangetrieben wurde (Noble 1977). So übertrifft die Zahl der Absolventen produktionsferner Ingenieurstudiengänge seit dem Ende der 20er Jahre deutlich die der Absolventen von anwendungsnahen Maschinenbaustudiengängen (Hughes 1991, S. 248 f.). Nach 1945 beschleunigte sich dieser Trend. In einschlägigen Studien wird von geradezu dramatischen Veränderungen in der Ingenieurausbildung in den 50er Jahren gesprochen, die zu einer immer stärkeren Betonung von Mathematik, Physik und Computerwissenschaften zu Lasten der Curricula des "nuts and bolts engineers" mit seiner Orientierung an industrieller Praxis und Problemen der Fertigung führte (Perucci 1971, S. 503). Diese Veränderungen betrafen die Lehrinhalte nahezu aller Ingenieurstudiengänge, aber es stiegen auch die Studententeile an stärker theoretisch orientierten Studiengängen, wie z.B. Electrical Engineering oder Engineering Sciences, beträchtlich (Zusman 1985, S. 60 ff.). Folgt man der Vermutung eines interviewten Hochschullehrers von einem Technical College, so beträgt das Verhältnis von Studenten der Engineering Sciences zu Studenten eher praktisch orientierter Studiengänge wie Manufacturing Engineering oder Engineering Technology seit einiger Zeit etwa 8 : 1 bis 10 : 1.

Ergebnis dieser Entwicklungstendenzen ist eine deutliche Polarisierung entlang einer Grenzlinie zwischen industriepraktischer und wissenschaftsorientierter Ausbildung des technischen Personals; zu unterscheiden sind folgende Typen:

(1) Absolventen eines praktisch orientierten Studiums an einem Community Technical College oder einer Proprietary Training School. Möglich ist ein Abschluß nach einer einjährigen Studiendauer mit einem "Occupational Degree"

20 Vgl. Lutz und Veltz (1989) sowie Maurice und Sorge (1990), denen zufolge eine solche Diskontinuität, d.h. vor allem ein kaum möglicher beruflicher Aufstieg zwischen den verschiedenen hierarchischen Positionen des technischen Personals, vor allem in Frankreich, zu finden ist.

oder nach einem zweijährigen Studium mit einem "Associate Degree". Die Absolventen dieses Studiengangs haben nach einem High-School-Abschluß in der Regel schon berufliche Erfahrung gesammelt, studieren häufig als Teilzeitstudenten und schlagen nach dem Studium Karrieren innerhalb des unteren und mittleren technischen Managements ein. Die Qualität dieser Ausbildungsgänge variiert offensichtlich beträchtlich, und neben der Vermittlung technischer Ausbildungsinhalte liegt ihr Schwerpunkt häufig auf der Verbesserung zivilisatorischer Grundqualifikationen wie Lesen, Schreiben, Rechnen, da es sich bei den Studenten häufig um die schlechteren High-School-Absolventen handelt (Grüner 1985; Kazis et al. 1989, S. 21).

(2) Absolventen eines vierjährigen Studienganges an einem Technical College oder einer Universität bzw. Engineering School, die mit einem "Bachelor Degree" abschließen und die in der Regel über keine Berufserfahrung verfügen. Dieser Studiengang weist zwei verschiedene Ausrichtungen auf: Einerseits gibt es gewisse praktisch-fertigungsorientierte Anteile, etwa im Studiengang "Manufacturing Engineering" oder "Engineering Technology", andererseits dominieren offensichtlich Studiengänge wie "Mechanical Engineering" oder "Electrical Engineering" mit ausgesprochener Entwicklungs- und Wissenschaftsorientierung. Ausschließlich in formaler Hinsicht läßt sich dieser vierjährige Abschluß mit der Abschlußprüfung an einer deutschen Fachhochschule vergleichen.

(3) Ingenieure mit einem mindestens sechsjährigen Studiengang und dem Abschluß eines "Master Degree" bzw. nach weiterer Studienzeit mit einem Ph.D. an einer Universität, einem der großen und renommierten wissenschaftlichen Institute oder einer der bekannten Engineering Schools. Nach allen vorliegenden Informationen sind diese Studiengänge weitgehend unabhängig von der je konkreten Fachrichtung sehr theoretisch orientiert. Beinhaltete beispielsweise der Studiengang des Mechanical Engineering in der Vergangenheit noch eine Ausbildung in Entwurf und Konstruktion, so verlieren derartige Elemente seit den 50er Jahren zugunsten von Disziplinen wie Analysis oder Informatik an Bedeutung (March et al. 1989, S. 28 ff.).

Ein Grund für diese Entwicklung liegt in dem - in allen industriellen Gesellschaften - beständig wachsenden Trend zu hohen, wissenschaftlichen Ausbildungsabschlüssen, da nur sie als Voraussetzung für eine erfolgreiche Berufskarriere angesehen werden. Diese Tendenz verschränkt sich in den USA mit der zunehmenden Ausrichtung eines erheblichen Anteils der Natur- und Ingenieurwissenschaften auf militärische FuE-Interessen und den durch Rüstungsforschung seit den 50er Jahren deutlich steigenden Beschäftigungs- und Karrieremöglichkeiten für Naturwissenschaftler und Ingenieure in FuE-Bereichen (LeBold et al. 1966, S. 244; Melman 1974, S. 70 ff.).²¹

21 Verschiedentlich wird betont, daß der Militärssektor in den USA jene Bedeutung für die Karriere begabter Individuen habe, die früher in Europa der Staat und das Kolonialwesen boten.

Die schon bestehenden Barrieren zwischen industriell-praktischen Tätigkeitsbereichen und FuE-Bereichen werden dadurch verfestigt. Diese Barrieren basieren in den Vereinigten Staaten auf der seit Jahrzehnten fortschreitenden Erosion der früheren betriebszentrierten Ausbildung und Karriereverläufe des technischen Personals, von qualifizierten Produktionsarbeitern - als Journeymen, Craftsmen oder als Machinist bezeichnet - bis hin zu Ingenieuren in der Metallverarbeitenden Industrie der USA. Denn im Unterschied zu Deutschland existierte ein auf Facharbeiterausbildung basierendes, institutionell ausgebautes und gefestigtes System weiterführender Bildungseinrichtungen nie. Es dominierten vielmehr im gesamten Bereich der Ausbildung des technischen Personals Formen betriebszentrierter Aus- und Weiterbildung; für Produktionsarbeit die verschiedenen Formen von drei- bis vierjährigen gewerkschaftlich kontrollierten "Apprenticeship Systems", für Techniker und höhere technische Angestellte interner Aufstieg und betriebsspezifische Qualifizierung. Charakteristisch für dieses, lange Jahrzehnte existierende System betriebszentrierter Ausbildung und Aufstiegs war, daß der gesellschaftliche Status von Produktionsingenieuren in den USA traditionell viel stärker an seinen betriebsinternen Aufstieg gekoppelt war als in Deutschland, wo der Abschluß an einer Universität oder Ingenieurschule schon fast allein eine hinreichende Bedingung für Ansehen und Reputation war und ist (König u.a. 1990).

Die verschiedenen Formen betriebszentrierter Ausbildung und innerbetrieblichen Aufstiegs wurden seit den 30er Jahren zunehmend ersetzt durch die Verkopplung von Position und Status mit schulischen Abschlüssen (Herrigel 1988). Das technische Personal differenziert sich entsprechend den verschiedenen Graden schulischer und universitärer Ausbildungsabschlüsse mit ihren jeweiligen Einstiegspositionen zu den verschiedenen technischen Tätigkeiten. Produktionsarbeiter wechseln in der Regel unmittelbar von der allgemeinbildenden High School in den Produktionsprozeß und durchlaufen Prozesse kurzfristigen Anlernens.²² Techniker kommen in der Regel von den Community Colleges oder den Proprietary

22 Bedeutungslos sind im amerikanischen Bildungssystem demgegenüber die berufsbildenden High Schools (Vocational High School) (Grüner 1985). Ihre Absolventen haben kaum ernsthafte Chancen auf dem Arbeitsmarkt, weil sie nicht nur als schlecht qualifiziert, sondern aufgrund ihrer sozialen Herkunft auch als lernunfähig angesehen werden (Kazis et al. 1989, S. 20).

Training Schools und Manager haben vier bis sechs Jahre in einem Technical College oder einer Universität studiert. Dabei spielen zunehmend auch Formen des Direktzugangs zu technischen Positionen durch technisch qualifiziertes Personal aus außerindustriellen Bereichen - wie etwa von staatlichen Einrichtungen - eine nicht unwichtige Rolle (Kazis et al. 1989, S. 15). So verwies einer der Gesprächspartner aus einem großem Werkzeugmaschinenbetrieb auf die hohe Bedeutung einer nahen, großen Luftwaffenbasis als Rekrutierungsbasis von Technikern und Ingenieuren.

Wie interviewte Experten betonten, verstärkt sich die Aufwertung schulischer Ausbildung noch seit Ende der 50er Jahre nach dem sog. "Sputnik-Schock", der in den USA zu einer weiteren Intensivierung der Aufwendungen für Rüstungs- und Weltraumforschung führte. Damit fand freilich kein Bruch in dem grundlegenden Verhältnis von schulischer und beruflicher Ausbildung in den USA statt, sondern schon bestehende strukturelle Differenzen wurden beträchtlich vertieft. Denn die skizzierte Entwicklung basiert auf der von jeher deutlichen Unterordnung beruflicher gegenüber schulischer Ausbildung und sie verstärkte die schon immer hohe Bedeutung des "formal schooling" in den USA (vgl. Piore, Sabel 1985, S. 101; Dertouzos et al. 1989, S. 84 ff.).²³ Damit brechen in den USA die Zugangswege zu den Positionen des technischen Personals über berufliche Praxis und betrieblichen Aufstieg nahezu endgültig weg.

d) Genereller Bedeutungsverlust der Ingenieurwissenschaften

Die Polarisierung des technischen Personals und die Differenzierung zwischen einer Minorität fertigungsorientierter und einer Majorität FuE-orientierter Ingenieure ist Moment eines zunehmenden Bedeutungsverlusts der Ingenieurwissenschaften im Wissenschaftssystem der USA. Deutlich wird dies an dem vergleichsweise geringen Anteil von Ingenieuren an der

²³ Die weithin bekannten Defizite des allgemeinbildenden Schulsystems der USA seien hier nicht weiter ausgeführt (z.B. Kazis et al. 1989). Das häufig mangelhafte Bildungsniveau seiner Absolventen dürfte vor allem in Zukunft erhebliche Konsequenzen für die Funktionsfähigkeit der vorherrschenden betriebsspezifischen Anlernprozesse aufgrund der dadurch erschwerten Rekrutierbarkeit motivierter und lernbereiter Arbeitskräfte haben (Bluestone et al. 1981, S. 130 ff.; Kap. VIII, 4.).

gesamten Gruppe von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in den USA in der Nachkriegszeit. So waren Anfang der 80er Jahre lediglich ca. 6 % aller Absolventen der hier in Frage stehenden Studiengänge Ingenieure, während der vergleichbare Anteil in Westdeutschland rd. 37 % betrug (Kazis et al. 1989, S. 22). Daher werden die USA im internationalen Vergleich verschiedentlich auch als "underengineered society" bezeichnet (Vernon 1986; Thurow 1987).

Die Ursache hierfür liegt darin, daß im Wissenschaftssystem der USA in der Nachkriegszeit Grundlagenorientierte und theoretische Wissenschaften, vor allem Informatik und auf "High Tech" ausgerichtete Forschung, beträchtlich an Gewicht gewannen. Gegenwärtig ist im Wissenschaftssystem der USA eine tiefgehende Segmentierung zwischen Institutionen, die sich mit Fragen praktischer Technikanwendung und solchen, die sich mit wissenschaftlich-theoretisch ausgerichteter Entwicklung von Technik befassen, anzutreffen. Bei den ersteren handelt es sich um die schon erwähnten Community und Technical Colleges und vereinzelt polytechnischen Colleges, die nur über begrenzte Ressourcen verfügen, deren Ansehen in der Regel gering ist und deren Qualität beträchtlich variiert. Die zweite Gruppe umfaßt die Universitäten und Engineering Schools, die oft sehr gut ausgestattet sind, ein hohes Renommee aufweisen und deren Ausbildungsgänge als "the most effective in the world" und "superior" angesehen werden (Kazis et al. 1989, S. 21 f.). Vor allem die Universitäten und die renommierten Engineering Schools wandten sich in der Nachkriegszeit verstärkt der Grundlagenforschung und militärisch orientierten, angewandten Forschung zu. Damit einher gingen zunehmend engere Beziehungen zu den Forschungsinstitutionen aus den "science based industries", während die wenigen Projekte industriell und zivil orientierter Technikentwicklung immer eine nachrangige Bedeutung hatten (z.B. Nelson 1988; Emspak 1990; Richardson et al. 1990).

Nicht zufällig finden sich daher ausgesprochen industrieorientierte Forschungseinrichtungen - wie etwa die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft in der Bundesrepublik - in den USA nicht, ebenso gab es in der Vergangenheit selten die staatliche Förderung produktionsbezogener FuE-Maßnahmen. So verfügte die National Science Foundation bis in die 80er Jahre hinein über kein eigenständiges produktionswissenschaftliches Förderprogramm (Wobbe 1988). Nicht zuletzt auch aufgrund dieser mangelnden Verknüpfung des Wissenschaftssystems mit industriellen Anwendungspro-

blemen und Fragen produktionsorientierter Technikentwicklung konnte das Pentagon mit seinen verschiedenen Technikförderprogrammen und den darüber bereitgestellten Ressourcen den beschriebenen starken Einfluß auf die fertigungstechnische Entwicklung der USA gewinnen.

VII. Deutsches Innovationsmuster

Im Unterschied zu den USA verlaufen sowohl die NC-Entwicklung als auch die gesamte fertigungstechnische Entwicklung bis heute in der Bundesrepublik noch im strukturellen Rahmen eines Innovationsmusters, dessen institutionelle Grundstrukturen eine lange Tradition aufweisen und die sich in der Nachkriegszeit nicht grundlegend veränderten. Dieses nationalspezifische Muster ist von einer engen Verschränkung von fertigungsorientierter Grundlagenforschung, anwendungsbezogener Forschung und Entwicklung und praktischer, im Produktionsprozeß gewonnener Erfahrung und Empirie gekennzeichnet. Die Nutzung von Wissenschaft und Forschung erfolgt unter dem bestimmenden Einfluß von Anwendungserfordernissen und darauf beruhender Erfahrung, die ein sehr breites und heterogenes industrielles Anwendungsfeld abdecken und insbesondere von der hohen Exportorientierung der deutschen Industrie geprägt werden. Technikentwicklung zeichnet sich unter diesen Bedingungen zwar auch durch eine generelle Tendenz zur fortschreitenden Verwissenschaftlichung aus, die zugleich jedoch von einem hohen Maß an markt- und anwendungsorientierter Elastizität bestimmt wird; insofern kann in der Bundesrepublik von einem flexiblen und marktbezogenen Innovationsmuster fertigungstechnischer Entwicklung gesprochen werden.

Dieses fertigungstechnische Innovationsmuster läßt sich als Moment einer spezifisch deutschen Tradition von Technikentwicklung verstehen, die - folgt man dem Technikhistoriker Radkau (1989) - weit ausgeprägter als in anderen Ländern sowohl von einer sehr flexiblen und marktvermittelten Einstellung auf den Bedarf als auch vom Streben nach Systematik und Theoretisierung geprägt ist. Aufgrund der früheren Entwicklung der Massenproduktion in den Fertigungsindustrien hatten die Vereinigten Staaten spätestens um 1900 einen Vorsprung im Maschinenbau gegenüber allen anderen Ländern. Daher verlief die fertigungstechnische Entwicklung in Deutschland spätestens seit dem Ende des letzten Jahrhunderts in mehr oder weniger ständiger Auseinandersetzung mit der amerikanischen Entwicklung. Die amerikanische Technik hatte zwar Vorbildcharakter, jedoch wurde sie in den wenigsten Fällen direkt übernommen. Die Vorbilder wurden, wie nicht zuletzt auch die NC-Entwicklung zeigte, in der Regel

durch Anpassung und Modifikation für die spezifischen deutschen und europäischen Verhältnisse nutzbar gemacht.

1. Investitionsgüter- und exportbestimmtes Produktionsmodell

Zwar folgte die ökonomische Entwicklung Deutschlands in den Jahrzehnten der Nachkriegszeit dem fordistischen Vorbild der USA, doch finden sich zugleich die bekannten Abweichungen und nationalspezifischen Besonderheiten: Die Industriestruktur der Bundesrepublik zeichnet sich durch ein im internationalen Vergleich ungewöhnlich breites Branchenspektrum mit einer überdurchschnittlichen Vielfalt von Produkten aus (Porter 1991, S. 380 ff.). Hervorstechendes Merkmal ist das bis heute große Gewicht der Investitionsgüterindustrie mit einer großen Breite hergestellter Produkte und einer vorherrschenden Einzel- bis Kleinserienfertigung, deren Bedeutung allerdings schon bis in das letzte Jahrhundert zurückreicht und eine Strukturbesonderheit der deutschen Industrieentwicklung darstellt. Wichtigster Sektor der Investitionsgüterindustrie ist der Maschinenbau, der - gemessen an Indikatoren wie Umsatz und vor allem Beschäftigung seit Kriegsende - die größte Industriebranche in der Bundesrepublik ist (Tab. 7). Die Massenproduktion in den Fertigungsindustrien hingegen entwickelte sich in der Nachkriegszeit sehr zögernd und gewann erst ab Mitte der 50er Jahre eine zunehmende Entwicklungsdynamik. Wie die vorliegenden Zahlen zeigen (Tab. 7), stiegen die Beschäftigtenzahlen in typischen Branchen wie der Automobilindustrie und der Elektrotechnischen Industrie erst ab dem Ende der 50er Jahre deutlich an. Sie waren in den dann folgenden Jahren allerdings der Träger des ökonomischen Wachstums, wohingegen die Beschäftigtenanteile des Maschinenbaus und Werkzeugmaschinenbaus nur noch langsam stiegen bzw. stagnierten (Bechtle, Lutz 1989, S. 36 ff.).

Schließlich ist die branchenstrukturelle Entwicklung der Nachkriegszeit in der Bundesrepublik nicht wie die der USA vom Einfluß eines militärisch ausgerichteten Industriesektors geprägt. Erst 1955 begann in zunächst sehr begrenztem Umfang der Aufbau einer Luft- und Raumfahrtindustrie. Mitte der 60er Jahre waren in der gesamten Rüstungsindustrie der Bundesrepublik nur ca. 1,2 % aller Erwerbstätigen beschäftigt, während ver-

gleichbare Zahlen für die USA im gleichen Zeitraum bei deutlich über 10 % lagen (Kap. VI, 2.1).¹ Fraglos wuchsen seit Ende der 60er Jahre der Rüstungssektor und insbesondere die Luft- und Raumfahrtindustrie staatlich protegiert, doch gewannen sie im Vergleich keineswegs jene strukturprägende Bedeutung wie die entsprechenden Industriezweige in den USA.

Zahlenmäßig zeigt sich dies daran, daß 1980 in der Bundesrepublik in der Luft- und Raumfahrtindustrie mit rd. 61.000 nur 0,8 % aller Arbeitskräfte des Verarbeitenden Gewerbes tätig waren, während in den USA zum gleichen Zeitpunkt allein in der Teilbranche "Aircraft and Parts" schon 2,8 % aller Arbeitskräfte der Industrie beschäftigt waren. Auch in dem darauffolgenden Jahrzehnt änderte sich diese Relation sowohl zwischen den Ländern als auch innerhalb der jeweiligen Industriestruktur kaum: 1990 fanden sich im Sektor "Aircraft and Parts" in den USA rd. 3,3 % aller Arbeitskräfte und in der Luft- und Raumfahrtindustrie der Bundesrepublik etwa 1 % (Tab. 6, 7).

Fraglos verschoben sich mit der Durchsetzung von Prinzipien der Massenproduktion auch die Betriebsgrößen hin zu größeren Einheiten (Bechtle, Lutz 1989, S. 39), doch behielten im Unterschied zu den USA kleinere und mittlere Betriebe mit wenig standardisierten und qualifikationsintensiven Produktionsprozessen ein zahlenmäßig höheres Gewicht als in den USA; so betrug 1972 der Anteil der Betriebe mit zehn bis 499 Beschäftigten an der Gesamtzahl der Betriebe der Verarbeitenden Industrie knapp 55 % im Gegensatz zu den USA mit rd. 47 % (Tab. 8). Bekanntermaßen finden sich diese Mittelbetriebe besonders im Maschinenbau, der mit seinen spezifischen Fertigungsbedingungen in besonderer Weise die Entwicklung von Fertigungstechnik prägte.

Die Industrialisierung in Deutschland war untrennbar mit einer ständig hohen und in vielen Branchen seit Jahrzehnten steigenden Weltmarktverflechtung verbunden. So wiesen die deutsche Investitionsgüterindustrie, aber beispielsweise auch die Chemieindustrie, schon seit Ende des letzten Jahrhunderts hohe und international überdurchschnittliche Exportquoten auf.² Der Anteil des deutschen Maschinenbaus am Weltexport von Maschinen lag in diesem Jahrhundert, mit Ausnahme der unmittelbaren Nachkriegszeiten, durchschnittlich bei deutlich über 20 %; er belief sich

1 Vgl. Melman 1983; eigene Berechnungen nach Vilmar 1969, S. 101.

2 Beispielsweise belief sich 1928 der deutsche Anteil an den Gesamtexporten von Chemikalien der acht weitestentwickelten europäischen Länder und der USA auf 43 % (Piore, Sabel 1985, S. 348, FN 33).

beispielsweise 1908 auf rd. 25 %, 1931 auf mehr als 34 %, 1970 auf ca. 24 %, um 1990 auf 21,5 % zu sinken (VDMA 1992). Seit den 60er Jahren wiesen aber auch die Industrien der Massenproduktion vergleichsweise hohe Exportquoten auf (Piore, Sabel 1985, S. 150 ff.). Die Exportquote des Bruttosozialprodukts der Bundesrepublik stieg schon Mitte der 50er Jahre auf ca. 20 %, um dann ab dem Ende der 60er Jahre weiter kontinuierlich zu wachsen, während die durchschnittlichen Exportquoten der USA deutlich darunter lagen (Tab. 9).

Die weitere wichtige Voraussetzung der industriellen Entwicklung in der Bundesrepublik sind die Arbeitsmarktbedingungen, die sich im Unterschied zu den USA durch eine hohe Bedeutung, arbeitsmarkttheoretisch gefaßt, berufsfachlicher Arbeitsmarktstrukturen auszeichnen (Sengenberger 1987, S. 126 ff.). Arbeitsorganisation und Arbeitskräfteeinsatz beruhen auf Formen nur begrenzter Arbeitsteilung und relativ weit gefaßten und qualifikatorisch anspruchsvollen Tätigkeitszuschnitten. Die quantitative und qualitative Mobilität der Arbeitskräfte erfolgt kurzfristig über zwischenbetrieblichen Arbeitsplatzwechsel und langfristig über Veränderungen der berufsbezogenen Ausbildungskapazitäten und -mechanismen. Arbeitskräfte sind im Unterschied zu den USA weder durch spezifische Arbeitsplatzanforderungen, den Erwerb betriebsspezifischer Qualifikationen noch durch betriebsspezifische Gratifikationen bzw. solche, die von der Beschäftigungsdauer abhängig sind, an den Einzelbetrieb gebunden. Diese Arbeitsmarktstrukturen umfassen den Maschinenbau und die weitere Investitionsgüterindustrie, wobei sich aber auch in Teilen der Massenfertigung berufsfachliche Arbeitsmarktstrukturen, z.B. in der großbetrieblichen Instandhaltung mit hauptsächlichem Facharbeitereinsatz, finden.

Das relativ große Gewicht derartiger Arbeitssysteme in der Bundesrepublik erklärt sich aus einem hohen Angebot von Arbeitskräften mit einer abgeschlossenen Berufsausbildung, das seinerseits auf dem fest institutionalisierten "Dualen System" der Berufsausbildung basiert. Historisch wurzelt diese Form der Berufsausbildung in der im Unterschied zu den USA weit zurückreichenden Handwerkstradition Deutschlands. Obgleich in der Nachkriegszeit auch in Westdeutschland mit der partiellen Durchsetzung der Massenproduktion von einer gewissen Erosion beruflich zentrierter Arbeitssysteme auszugehen ist, kann von einer bis heute vorherrschenden hohen Bedeutung berufsfachlicher Teilarbeitsmärkte ausgegangen werden (ebd., S. 181). Im Gegensatz zum endgültigen Verschwinden des in der

Nachkriegszeit ohnehin nur noch rudimentär vorhandenen betriebszentrierten Ausbildungswesens war die Leistungsfähigkeit des Berufsbildungssystems in der Bundesrepublik bis in die jüngste Vergangenheit ungebrochen.³

Eine Voraussetzung dafür war die im internationalen Vergleich beträchtliche staatliche Förderung und weite politische Unterstützung des Systems der beruflichen Bildung in der Bundesrepublik (Kazis et al. 1989). Darüber hinaus sind aber auch die Auswirkungen des bundesdeutschen Systems der industriellen Beziehungen in Rechnung zu stellen, das nicht zum Aufkommen ähnlich rigider Arbeitsstrukturen wie in angelsächsischen Ländern beitrug. Einmal verfolgten aufgrund normativer Kündigungs- und Bestandsschutzregelungen die Gewerkschaften keine Politik der Beschäftigungsabsicherung durch Senioritätsregeln und Tätigkeitsabgrenzungen, die Arbeitsstrukturen vertraglich fixieren. Außerdem gibt es seit der Neuordnung der westdeutschen Gewerkschaften nach dem Zweiten Weltkrieg auf der Basis des Industrieverbandsprinzips so gut wie keine berufsständischen Arbeitnehmerorganisationen mehr, die - miteinander konkurrierend - in ihrer Vertretungsmacht vom Monopol ihrer Mitglieder bei der Besetzung bestimmter Arbeitsplätze oder Arbeitsplatzbereiche im Betrieb abhängig wären (Sengenberger 1987, S. 149).

Die Auswirkungen dieses Systems der industriellen Beziehungen auf Technikeinsatz und Technikentwicklung liegen auf der Hand: Innovationen kollidieren nicht in dem Maße wie in den USA mit rigiden Tätigkeitsstrukturen und festgefügtten, langjährig eingespielten Arbeitsplatzinteressen, sondern innerbetriebliche Anpassungs- und Modernisierungsmaßnahmen lassen sich unter diesen Bedingungen vergleichsweise problemlos durchführen und Konflikte elastisch bewältigen. Insofern erweisen sich schon aus diesen Gründen deutsche Betriebe als innovationsfähiger als amerikanische Industriebetriebe (Erd 1989, S. 14 f.).

3 Erst in den letzten Jahren verliert dieses System insbesondere aufgrund der wachsenden Bedeutung qualifizierter schulischer Abschlüsse im Zuge der Bildungsexpansion seine, bis heute vor allem im internationalen Vergleich immer wieder betonte Effektivität für die Versorgung der Industrie mit qualifizierten Produktionsarbeitern (Kazis et al. 1989; Köhler, Grüner 1989).

2. Flexible Entwickler-Anwender-Beziehungen

Element der industriestrukturellen Bedingungen sind Entwickler-Anwender-Beziehungen, die sich im Vergleich zu den USA als überaus flexibel erweisen. Sie orientieren sich an einem breiten Spektrum sehr verschiedener Fertigungsprobleme. Bestimmend sind letztlich Marktanforderungen des Inlandsmarktes und insbesondere der Exportmärkte; eine Dominanz der Rüstungsproduktion findet sich nicht.

a) Anhaltender Innovationsdruck der Anwender

Der Einfluß industrieller Anwendungserfordernisse auf die fertigungstechnische Entwicklung in der Bundesrepublik zeigt sich an einem breiten Anwendungsbezug, der in deutlichem Kontrast zu den Anwendungsbedingungen steht, die die Technikentwicklung in den USA dominieren; erkennbar ist ein vielfältiges Anwendungsspektrum der deutschen Fertigungstechnik, das sich durch sehr verschiedene Bedingungen und Erfordernisse charakterisieren läßt.

Die eine Seite dieses Spektrums wird, ähnlich wie beim zivilen Innovationsmuster der USA, vom Einfluß großbetrieblicher Technikanwender bestimmt. Es handelt sich dabei um Betriebe der Serien- und Massenproduktion. So wurden Ende der 70er Jahre etwa 30 % der Werkzeugmaschinenproduktion an Betriebe aus der Automobilindustrie verkauft; weitere Hauptkunden aus den Bereichen der Massenfertigung waren die Elektrotechnische Industrie und die Eisen-, Blech und Metallwarenindustrie (VDMA 1980, S. 15). Ähnlich wie die entsprechenden Großbetriebe der USA richteten sich die Interessen dieser Anwender insbesondere unter den Bedingungen einer expandierenden Massenproduktion in den 60er und ersten 70er Jahren naturgemäß auf spezialisierte Technikkonzepte. Typisch sind hierfür Transferstrassen, konventionell automatisierte Werkzeugmaschinen wie Drehautomaten und insbesondere auch die frühen, sich an amerikanischen Vorbildern orientierenden NC-Konzepte mit nur begrenzter Flexibilität, aber hohen Automatisierungsgraden.

Die andere Seite des Anwendungsspektrums wird von kleinbetrieblichen Anwendern bestimmt. Im Unterschied zu den USA, wo kleinere Metallbetriebe keinen nennenswerten Einfluß auf die fertigungstechnische Ent-

wicklung genommen haben, spielen sie für wichtige Sektoren des deutschen Werkzeugmaschinenbaus eine bestimmende Rolle. So bilden - teilweise regional konzentriert - Kleinbetriebe, die zumeist Zulieferer großer Massenhersteller sind, für einige größere Werkzeugmaschinenhersteller, z.B. Traub bei Drehmaschinen oder Deckel bei Fräsmaschinen, das traditionelle Absatzfeld, auf das sich bis heute die Entwicklungsstrategien dieser Hersteller beziehen. Die Anwendungsbedingungen von Fertigungstechnik sind bei diesen Kleinbetrieben sehr unterschiedlich: So finden sich sowohl, etwa im wichtigen Werkzeug- und Formenbau, komplexe und qualifikationsintensive Prozesse, wo relativ aufwendige Maschinen Einsatz finden, als auch wenig anspruchsvolle und standardisierte Arbeitsvorgänge mit der Herstellung von Massenteilen, für die einfache, universell einsetzbare und leicht zu bedienende Werkzeugmaschinen benötigt werden.

Den Kern dieses breiten Anwendungsbezugs bildet jedoch die zumeist mittelbetrieblich strukturierte, komplexe Einzel- bis Kleinserienfertigung, von der vergleichsweise dynamische Anforderungen an die Entwicklung von Fertigungstechnik ausgehen. In diesem Feld hat aufgrund seiner industriestrukturellen Bedeutung der Maschinenbau eine Schlüsselrolle; vorliegenden Zahlen zufolge wurden Ende der 70er Jahre etwa 30 % der Werkzeugmaschinenproduktion in dieser Branche abgesetzt (VDMA 1980, S. 15).

Der Maschinenbau stellt ein überaus heterogenes Anwendungsfeld für Fertigungstechniken dar, und von ihm geht vor allem auch aufgrund der hohen Weltmarktverflechtung ein starker Innovationsdruck auf die verfügbare Fertigungstechnik aus. Als besonderes Merkmal dieser Branche galt daher auch seit jeher ihr "Rationalisierungsdilemma", nämlich der nur schwer zu bewältigende Gegensatz zwischen den Anforderungen nach Ökonomisierung und Flexibilisierung der Produktion. Damit in Zusammenhang steht, daß die zumeist mittelbetrieblichen Strukturen des Maschinenbaus durch eine gering ausgeprägte Arbeitsteilung, flache Hierarchien, durchlässige Abteilungsgrenzen und einen Einsatz zumeist qualifizierter Facharbeiter gekennzeichnet sind. Existierende Büros der Arbeitsvorbereitung verfügen vielfach nur über begrenzte Planungskompetenzen für die Fertigung. Obgleich an einem tayloristischen Leitbild orientiert, führte die Rationalisierung im Maschinenbau nicht zu einer durchgreifenden Spezialisierung und Marginalisierung von Produktionsarbeit, sondern es erhielten sich vielfältige und qualifikationsintensive Arbeitsanforde-

rungen (z.B. Hirsch-Kreinsen u.a. 1990). Daher mußte Fertigungstechnik für die häufig nur unzulänglich kalkulierbaren Fertigungsbedingungen in Form einer hohen technisch-organisatorischen Flexibilität - bei NC-Maschinen eben durch direkte Programmiermöglichkeiten - ausgelegt werden. Neben dem Preis spielen daher beim Einsatz von Fertigungstechnik Kriterien wie Anpassungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eine überaus wichtige Rolle.

Darüber hinaus wird im internationalen Vergleich auf die vergleichsweise hohe technische Kompetenz der fertigungstechnischen Anwenderbetriebe aus dem deutschen Maschinenbau und den auch daraus resultierenden hohen Einfluß, den sie auf fertigungstechnische Entwicklung nehmen, verwiesen. Wie in amerikanischen Untersuchungen betont wird, seien die deutschen Anwender im Unterschied zu amerikanischen Anwenderbetrieben weit eher bereit und in der Lage, detaillierte Spezifikationen und Anforderungen an für sie bestimmte Maschinenkonzepte zu formulieren und diese gegenüber den Herstellern, häufig in eingespielten engen Entwickler-Anwender-Beziehungen, durchzusetzen (March et al. 1989, S. 44 f.).

Ähnliche Anforderungen wie der Inlandsmarkt stellen auch die Exportmärkte. Im Unterschied zu den USA stieg seit den 50er Jahren der Anteil des Werkzeugmaschinenexports an der Gesamtproduktion kontinuierlich und betrug in den letzten Dekaden teilweise mehr als 70 %; darüber hinaus war die westdeutsche Werkzeugmaschinenindustrie bis in die 80er Jahre hinein der größte Exporteur auf dem Weltmarkt (Tab. 14). Daher schlagen die sehr vielfältigen Anforderungen des Weltmarktes und dabei insbesondere des westeuropäischen Absatzmarktes - der größte Absatzmarkt des westdeutschen Werkzeugmaschinenbaus - unmittelbar auf die fertigungstechnische Entwicklung in der Bundesrepublik durch. Selbst im Bereich relativ standardisierter Werkzeugmaschinen und Fertigungssysteme konnten daher in Westdeutschland immer nur kleinere Serien mit vielen verschiedenen Typen und Varianten hergestellt werden. Die hohe technische Kompetenz und verfügbaren Innovationsressourcen erlaubten dem Werkzeugmaschinenbau zudem problemlos, für dieses weite Absatzfeld teure und spezialisierte Problemlösungen anzubieten. Die in den 50er Jahren von einigen Werkzeugmaschinenherstellern angestrebte "Amerikanisierung" der fertigungstechnischen Entwicklung erwies sich daher als nicht erfolgreich (Pirker u.a. 1970, S. 69 f.).

Dagegen spielen in der Bundesrepublik Deutschland die Betriebe der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie mit ihren spezifischen, besonders vom allgemeinen Maschinenbau abweichenden Fertigungsbedingungen erst in jüngerer Zeit eine gewisse Rolle. Soweit bekannt, wurden in der Vergangenheit lediglich wenige aufwendige maschinen- und steuerungstechnische Speziallösungen für diese Branche konzipiert (Kief 1991), die geringe Rückwirkungen auf die fertigungstechnische Entwicklung hatten. Deutlich wird dies an der, schon angeführten (Kap. V, 1.), vergleichsweise geringen Bedeutung dieser Branche für den Absatz von NC-Maschinen, der in den 60er Jahren einen durchschnittlichen Anteil von 1,7 % an der Gesamtzahl produzierter und im Inland abgesetzter NC-Maschinen aufwies. Auch bis zum Anfang der 90er Jahre verharrte dieser Anteil in der gleichen Größenordnung und lag jährlich teilweise deutlich unter 2 % (Tab. 4; VDW 1992). Nicht zufällig finden sich in Betrieben der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie der Bundesrepublik häufig nach amerikanischem Vorbild konzipierte oder aus den USA übernommene fertigungstechnische Systeme und Anlagen.⁴

b) Vom Werkzeugmaschinenbau bestimmte Entwicklerkonstellation

Charakteristisch für das Arrangement der Technikentwickler ist ein relativ enges Netzwerk verschiedener industrieller und nicht-industrieller Entwickler und Hersteller, das sich insbesondere durch eine enge Kooperation zwischen industriellen Entwicklern aus dem Werkzeugmaschinenbau und ingenieurwissenschaftlichen Institutionen auszeichnet.⁵ Dominierender Akteur in diesem Geflecht ist der Werkzeugmaschinenbau, der nicht

-
- 4 Ein Beispiel dafür ist ein Anfang der 80er Jahre bei dem Flugzeughersteller MBB installiertes großes flexibles Fertigungssystem "CIAM" (Computer Integrated and Automated Manufacturing), mit dem eine weitreichende Automatisierung und Zentralsteuerung der Fertigung komplexer Flugzeugteile realisiert wurde. Allen vorliegenden Informationen zufolge, galt dieses System aufgrund seiner Kosten und Komplexität jedoch nie als nachahmenswertes Vorbild für zivile Anwender. Die Vermutung liegt nahe, daß sich die Entwicklung dieses Systems an amerikanischen Konzepten, die im Rahmen des ICAM-Programms der Air Force Ende der 70er Jahre entstanden, orientierte.
 - 5 Zu den im Maschinenbau vorherrschenden Innovationsprozessen und Entwicklerstrukturen vgl. auch die Befunde einer gerade abgeschlossenen Studie von Kalkowski und Manske (1993).

nur die vielfältigen Anforderungen der Technikanwender aufgreift, sondern von dem selbst auch Initiativen zu fertigungstechnischen Innovationen ausgehen. So war, wie gezeigt, die breite Entwicklung von Handeingabesteuerungen ab Mitte der 70er Jahre nicht nur Resultat eines wachsenden Anwenderinteresses an billigen und flexibel einsetzbaren NC-Maschinen, sondern auch das Ergebnis von Innovationsanstrengungen einzelner Werkzeugmaschinenbaubetriebe (Kap. V, 3.). Dabei dominieren allerdings keineswegs einzelne, etwa größere, Betriebe den Entwicklungsprozeß in besonderer Weise. Vielmehr waren daran auf ihren spezifischen technischen Feldern Betriebe sehr unterschiedlicher Größe beteiligt; es handelt sich dabei sowohl um die bekannten größeren Hersteller von Standardmaschinen wie beispielsweise Deckel und Heller bei Fräsmaschinen oder Pittler, Traub und Gildemeister bei Drehmaschinen als auch um kleinere kundenspezifische Nischenproduzenten wie Scharmann und Hüller. Ein Indikator für die Innovationsfähigkeit des Werkzeugmaschinenbaus sind die im Vergleich zu den USA hohen betrieblichen FuE-Aufwendungen im westdeutschen Werkzeugmaschinenbau.

So betrug vorliegenden Zahlen zufolge der Anteil für FuE-Aufwendungen am Umsatz im bundesdeutschen Werkzeugmaschinenbau 1978 branchendurchschnittlich 8 % (Geer u.a. 1980, S. 153) und lag damit deutlich über dem entsprechenden Aufwand im Werkzeugmaschinenbau der USA. Im gesamten deutschen Maschinenbau belief sich der entsprechende Aufwand auf durchschnittlich rd. 3 % (3,2 % 1987) im Unterschied zu einem deutlich niedrigeren Wert in den USA (1,7 % 1987) (Häusler 1990, S. 33 f.).

Forschung und Entwicklung werden freilich nicht primär innerbetrieblich in den Betrieben des Werkzeugmaschinenbaus erbracht, da die meisten Betriebe dieser Branche über keine ausgeprägten FuE-Bereiche verfügen.⁶ Diese Funktion wird bis heute im Werkzeugmaschinenbau vielmehr hauptsächlich in einem engen Verbund zwischen Unternehmen, Hochschulinstituten und außeruniversitären Instituten betrieben.

In diesem Verbund wird der besondere Charakter des deutschen Innovationsmusters deutlich, nämlich die von fertigungspraktischen Erfordernissen bestimmte Nutzung von Wissenschaft und Technologie: Es existieren stabile und enge Formen der Zusammenarbeit zwischen dem Werkzeug-

6 Erst seit ein paar Jahren ist die Einrichtung solcher Bereiche in einigen größeren Betrieben, etwa im Zuge der NC-Entwicklung, zu beobachten (Kief 1991; Wolf u.a. 1992, S. 107 ff.).

maschinenbau und den wissenschaftlichen Instituten, an denen sowohl fertigungsorientierte Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung betrieben werden (z.B. Maurice, Sorge 1990, S. 27 f.). Es handelt sich dabei in der Bundesrepublik um eine ganze Reihe von Universitätsinstituten, Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft wie auch Instituten von Fachhochschulen, die sich mit Maschinenbau bzw. der ingenieurwissenschaftlichen Disziplin Fertigung und Werkzeugmaschinen sowie der Entwicklung von Fertigungstechniken der verschiedensten Art befassen. Diese Institute sind sowohl über wissenschaftlich-akademische Institutionen - eine einflußreiche Rolle spielt dabei die 1937 gegründete und bis heute existierende Hochschulgruppe Fertigungstechnik⁷ - untereinander eng verbunden als auch über Forschungsaufträge, Verflechtungen über Verbände und personell eng mit dem Maschinenbau und Werkzeugmaschinenbau verschränkt. Während sich in den USA fertigungstechnische Entwicklung auf wenige Institute mit expliziter Orientierung an Grundlagenforschung konzentriert, hat sich in der Nachkriegszeit in der Bundesrepublik eine größere Zahl arbeitsteilig und spezialisiert arbeitender Wissenschaftseinrichtungen etabliert.

Wie sich nicht zuletzt im Verlauf der NC-Entwicklung zeigte, spielen diese Institutionen im Prozeß der Technikentwicklung eine doppelte Rolle: Erstens fungieren sie als wichtige Informationsbeschaffer und Informationsvermittler über neue Technologien und ihre Potentiale; auch entwickeln sie gelegentlich erste Entwürfe oder Prototypen neuer fertigungstechnischer Lösungen. Zweitens betreiben die Institute zu größeren Anteilen praktisch orientierte Auftragsforschung, wobei ein beträchtlicher Teil der Aufträge direkt aus Unternehmen kommt (Spur 1979, S. 407 ff.). Hier dürfte die eigentliche Bedeutung dieser wissenschaftlichen Einrichtungen im Prozeß der fertigungstechnischen Entwicklung liegen: die gezielte Bereitstellung wissenschaftlich-technologischen Know-hows für innovative Lösungen, die von der Industrie angeregt und gefordert werden.

Die Finanzierung der Forschung durch Aufträge der Industrie und die oftmals daraus resultierende enge Zusammenarbeit zwischen Hochschul- und Industrieforschern hat in Deutschland eine lange Tradition (Hirsch 1970, S. 151). Vorliegenden Durchschnittszahlen zufolge erhalten die Hochschulinstitute zu etwa 20 % eine staatliche Grundfinanzierung, und sie werden zu ca. 80 % über Auf-

7 Seit einigen Jahren Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP).

tragsforschung finanziert, die sich wiederum in Industrienaufträge (ca. 35 %) und im weitesten Sinn staatlich geförderte Projekte (ca. 45 %) aufteilt (March et al. 1989, S. 47). Die Fraunhofer Institute wurden Mitte der 80er Jahre zu rd. 35 % von Bund und Ländern finanziert und mußten die restlichen 65 % über industrielle und öffentliche Auftragsforschung erbringen (BMFT 1988, S. 289).

Neben diesen über lange Jahrzehnte hinweg existierenden und eingespielten Beziehungen zwischen dem Werkzeugmaschinenbau und den Ingenieurwissenschaften spielen horizontale FuE-Beziehungen zwischen verschiedenen Werkzeugmaschinenbetrieben (Häusler 1990, S. 81 ff.) eine nur nachgeordnete Rolle. Zwar wird im Vergleich zu den USA das Fehlen einer durch Gesetzgebung verstärkten konkurrentiellen Abschottung betont und das Verhältnis der Betriebe als Mischung von Konkurrenz einerseits, Kooperation und Abstimmung andererseits charakterisiert (Herrigel 1988), doch bleiben die Kontakte häufig punktuell und informell; sie werden beispielsweise von Ingenieuren getragen, die gemeinsam studiert haben. Im Zuge der fortschreitenden "Elektronisierung" und Komplexitätssteigerung von Werkzeugmaschinen sind allerdings in den 80er Jahren intensiviertere Entwicklungsbeziehungen zwischen einzelnen Werkzeugmaschinenbetrieben unübersehbar. Für den einzelnen Betrieb wird dadurch komplementäres Spezialwissen verfügbar, über das er in der Regel aus Kosten- oder Kapazitätsgründen nicht verfügt (Kreher 1992).

Ähnliches läßt sich über die vertikalen Austauschbeziehungen des Werkzeugmaschinenbaus zu Zulieferbetrieben sagen. Über lange Jahre hinweg beschränkten sich diese, zumeist rein marktmäßigen, Beziehungen auf eine sehr begrenzte Zahl von Betrieben; der westdeutsche Maschinenbau insgesamt zeichnete sich durch eine hohe Fertigungstiefe aus (IG Metall 1991). Doch zeigen sich auch hier im Zuge der fortschreitenden Nutzung von Computertechnologien deutliche Wandlungsprozesse. So wurden im Verlauf der NC-Entwicklung Beziehungen zwischen dem Werkzeugmaschinenbau und Steuerungsherstellern aus der Elektrotechnischen Industrie ausgebaut und intensiviert. Darüber hinaus entstand im Verlauf 80er Jahre eine ganze Reihe von Kooperationsbeziehungen zu Software-Häusern, um die zunehmenden Entwicklungsanforderungen bewältigen zu können (Kap. VIII, 3.). Ähnlich wie bei den wissenschaftlichen Instituten ging dabei die Initiative vielfach von Werkzeugmaschinenherstellern aus (Engelskirchen 1971; Kief 1991). Wie ein Experte eines Steuerungsherstellers betonte, entwickelten sich "enge Vertrauensverhältnisse" zwischen den verschiedenen Beteiligten, wobei die Entwicklungsanstöße häu-

fig von den "Großkunden" des Werkzeugmaschinenbaus kamen. Direkt von den Elektrotechnischen Herstellern ausgehende Innovationsanstöße in Hinblick auf die Nutzung von Informationstechnologien waren bislang, Expertenäußerungen zufolge, offensichtlich selten (z.B. auch Maurice, Sorge 1990, S. 22).

Dieses Netzwerk zwischen den verschiedenen industriellen und wissenschaftlichen Entwicklern wird gestützt und stabilisiert durch die vermittelnde Rolle von Verbänden und professionellen Zusammenschlüssen. Zu nennen sind hier der VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.), der VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.) und auch der VDI (Verein Deutscher Ingenieure), die von Industrievertretern und Ingenieurwissenschaftlern getragen werden.⁸ Im Unterschied zu den USA bieten sie im Rahmen fest etablierter Treffen und Gremien, an denen gleichermaßen Betriebspraktiker wie auch Wissenschaftler teilnehmen, die Möglichkeit eines kontinuierlichen Austauschs von Erfahrungen und Know-how sowie die Herstellung von Kontakten, aus denen dauerhafte Kooperationsbeziehungen hervorgehen.

Von Bedeutung sind beispielsweise die mehr oder weniger kontinuierlich tagenden Erfahrungsaustauschgruppen beim VDMA bzw. VDW oder die Fachgliederungen des VDI, von denen die seit 1920 existierende VDI-Gesellschaft für Produktionstechnik, vormals Arbeitsgemeinschaft Deutscher Betriebsingenieure (ADB), eine wichtige Rolle in diesem kooperativen Prozeß spielt.

Daneben spielen nicht nur für die Bereitstellung von Know-how und Informationen, sondern insbesondere auch für die Finanzierung kooperativer FuE-Maßnahmen verschiedene Förderinstitutionen eine maßgebliche Rolle. Wesentlich ist dabei aufgrund ihrer unbestreitbaren Multiplikatorwirkung besonders die zum Teil staatlich finanzierte Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), die sich seit ihrer Gründung 1954 vor allem auf die FuE-Förderung im Maschinenbau richtet (AIF 1982).

8 1891 wurde der VDW als "Vereinigung Deutscher Werkzeugmaschinenfabrikanten" auf Initiative des Düsseldorfer Werkzeugmaschinenunternehmers E. Schiess gegründet. Zunächst zielte seine Gründung auf die verbesserte Durchsetzung wirtschaftlicher Interessen dieser Branche. Relativ bald jedoch entwickelte er sich auch zu einem Diskussionsforum über Fragen der Technikentwicklung, an dem neben Betriebspraktikern auch Ingenieurwissenschaftler eine immer wichtigere Rolle spielten (Spur 1991, S. 335 ff.).

Die AIF repräsentiert eine größere Zahl von Forschungsvereinigungen, in denen überwiegend kleine und mittlere Unternehmen mit gleichen und ähnlichen FuE-Interessen zusammengeschlossen sind. In Fachausschüssen werden neue Forschungsvorhaben beraten, laufende Projekte betreut und die Verbreitung von Ergebnissen organisiert. Gefördert werden in diesem Rahmen sowohl spezifische Grundlagenforschungen als auch branchenübergreifende Projekte, die in enger Kooperation von Betrieben und Hochschulinstituten bearbeitet werden. Die Forschungsfinanzierung über die AIF ist insbesondere für Klein- und Mittelbetriebe ohne eigene FuE-Abteilungen interessant (vgl. Asdonk u.a. 1988, S. 67 f.). Seit der Gründung stiegen die jährlich verfügbaren Fördermittel der AIF von rd. einer Million DM 1954 auf rd. 82 Mio. DM 1982. Eine koordinierende Funktion im Rahmen dieser Forschungsaktivitäten führt seit 1968 das Forschungskuratorium Maschinenbau (FKMB) aus, das von der AIF und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert wird (AIF 1982).

Schließlich ist auf den vermittelnden Einfluß staatlicher Technologiepolitik zu verweisen, die in der Kontinuität einer lange zurückreichenden industrieorientierten staatlichen Politik in Deutschland steht (Kap. VII, 4.). Zwar werden fertigungstechnische Entwicklungsprojekte erst seit den 70er Jahren gefördert, jedoch gewinnt die staatliche Technologiepolitik eine zunehmende Bedeutung. Unbeschadet aller Kritik im einzelnen, kann ihr eine nicht unwichtige Verstärkerfunktion im Prozeß der Einführung von fertigungstechnischen Innovationen zugeschrieben werden.

Zu nennen sind staatliche Aktivitäten wie die verschiedenen Maßnahmen zur Förderung des FuE-Personals durch das Bundeswirtschaftsministerium, das Programm zur Humanisierung der Arbeit seit der ersten Hälfte der 70er Jahre, dessen Förderung sich auf die Entwicklung von Fertigungstechnik richtete, sowie die verschiedenen unmittelbar auf Fertigungstechnik gerichteten Förderprogramme seit Ende der 60er Jahre: die Programme zur Förderung der Datenverarbeitung, Prozeßdatenverarbeitung und CAD in den 70er Jahren und die sich daran seit Beginn der 80er Jahre anschließenden - bislang - drei Programme zur Förderung der Fertigungstechnik des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (PFT 1991).

Folgt man den Einschätzungen von Betriebsexperten, so wurden im Rahmen staatlicher Projekte zumeist Innovationen industrieller Entwickler aufgegriffen und ihre Entwicklung zur Anwendungsreife gefördert. Zwar ließe sich daher vermuten, daß diese Innovationen ohnehin weitergetrieben worden wären, doch wurden nicht selten über staatliche Projekte zusätzliche Ressourcen mobilisiert, Barrieren zwischen verschiedenen Entwicklern abgebaut, Kooperationsprozesse initiiert und die Promotoren der geförderten Innovation mit zusätzlichem Einfluß ausgestattet.

Als Beispiel für diese Rolle staatlicher Technologiepolitik kann das schon erwähnte WOP-Projekt (Werkstatorientierte Programmierverfahren; Kap. V, 3.) angesehen werden. Mit diesem Projekt wurde das schon vorhandene besonders "werkstattfreundliche" Konzept einer Drehmaschinensteuerung weiterentwickelt und an die Erfordernisse der Fräs- und Bohrbearbeitung sowie der Schleif- und Blechbearbeitung angepaßt (Liese 1989).

Ungeachtet der unter wechselnden politischen Bedingungen jeweils verschiedenen Ziele und Formen der Innovationsförderung laufen diese staatlichen Maßnahmen auf eine Stützung und Intensivierung der bestehenden Entwicklerstrukturen sowohl in horizontaler Hinsicht zwischen industriellen Herstellern als auch in vertikaler Hinsicht zwischen Betrieben verschiedener Teilbranchen und wissenschaftlichen Institutionen hinaus (Ziegler 1989, S. 206 ff.).

3. Theoretische und praktische Strukturierung des technischen Personals

a) Industrieorientiertes Entwicklungspersonal

Die engen Kooperationsbeziehungen innerhalb der skizzierten Entwicklerkonstellation werden anders als in den Vereinigten Staaten maßgeblich von einem Typus technischen Personals getragen, dessen qualifikatorische Basis eine enge Verschränkung von praktischen Kenntnissen und Erfahrungen mit wissenschaftlichem Know-how und theoretischem Wissen ist. Folgt man vorliegenden Daten, so finden sich im westdeutschen Werkzeugmaschinenbau im internationalen Vergleich - nicht nur im Verhältnis zu den USA, sondern auch zu Frankreich - überdurchschnittlich viele Ingenieure (vgl. Maurice, Sorge 1990, S. 32 f.).

So betrug der Anteil von Ingenieuren an der Gesamtbeschäftigtenzahl im Maschinenbau 1955 5,2 %, 1961 4,4 %, 1968 5,0 % und 1982 7,0 % (VDMA 1988). Im Werkzeugmaschinenbau betrugen die entsprechenden Anteile 1961 4,1 %, 1968 5,2 % und 1982 5,3 % (VDMA 1983).

Überproportional ist dabei bis heute der Anteil von Maschinenbauingenieuren, deren Ausbildung sich im Vergleich zu den amerikanischen Mechanical Engineers durch einen hohen Praxisbezug auszeichnet. Zwar re-

duzierte sich seit den 50er Jahren nicht zuletzt aufgrund des wachsenden Stellenwerts der Informatik der Anteil von Maschinenbauingenieuren an den Ingenieuren insgesamt, doch kommt dieser Gruppe eine unvermindert hohe Bedeutung zu.

Die im Vergleich zu den USA weit höhere Bedeutung von Maschinenbauingenieuren zeigt sich zahlenmäßig daran, daß diese Fachrichtung vor allem in den 60er Jahren den zweithöchsten Anteil an der Gesamtzahl der Diplomingenieure ausmachte. Dieser Anteil betrug 1961 rd. 34 % und 1970 rd. 31 % (Batelle, zit. in: Busch u.a. 1979, S. 310).

Der Praxisbezug der Ingenieure zeigt sich darüber hinaus besonders an dem bis heute hohen Anteil von Fachschul- bzw. Fachhochschulabsolventen, der seit den 60er Jahren im Maschinenbau relativ konstant bei etwa zwei Dritteln aller Ingenieure liegt. Freilich ist zugleich eine Verschiebung der Ingenieurstruktur in Richtung theoretisch ausgebildeter Ingenieure infolge der wachsenden Bedeutung von Mikroelektronik und Computerintegration in den Produkten des Werkzeugmaschinenbaus unübersehbar. So nimmt der Anteil der Maschinenbauingenieure vor allem zugunsten von Elektroingenieuren in den letzten Jahren ab, während Informatiker einen zwar steigenden, aber immer noch kleinen Anteil ausmachen. Außerdem verschob sich deutlich das Verhältnis der Fachhochschulabsolventen zu den TU-/TH-Absolventen; kamen in den 60er Jahren auf einen Hochschulabsolventen ungefähr vier Absolventen der damaligen "Ingenieur-Schulen", so sind es in den 80er Jahren nur noch zwei bis drei (VDMA 1988, S. 3).

1968 waren fast 81 % aller Ingenieure im Maschinenbau Maschinenbauingenieure, 1982 rd. 68 % und 1987 noch ca. 60 %. Demgegenüber stieg der Anteil von Ingenieuren der Elektrotechnik von 9,4 % 1968 auf 15,5 % 1987 und der der Informatiker von 1,1 % 1982 auf 3,3 % 1987.

Die Ingenieure arbeiten, fraglos wiederum im Unterschied zu den USA, in relativ engem Bezug zu betrieblichen Anwendungs- und Fertigungsproblemen. Die Entwicklungs- und Konstruktionsarbeiten zeichnen sich durch enge Beziehungen zu Fertigungs- und Werkstattbereichen aus. Im einzelnen finden sich zwar unterschiedliche, insgesamt gesehen doch geringe interne Differenzierungen zwischen verschiedenen Werkstattbereichen und Konstruktions- und Entwicklungsabteilungen im bundesdeutschen Werkzeugmaschinenbau; zwar lassen sich in Abhängigkeit von der Betriebsgröße unterschiedliche Grade der Arbeitsteiligkeit beobachten,

jedoch finden sich weitgehend ähnliche Ablaufstrukturen zwischen konstruktiven und fertigenden Bereichen (Wolf u.a. 1992, S. 100 ff.). Einen Hinweis auf die offenbar wenig ausgeprägte Grenzziehung zwischen Konstruktions- und Fertigungsbereichen geben beispielsweise auch die im deutschen Maschinenbau schon bis in die 20er Jahre zurückreichenden Versuche der Durchsetzung von Prinzipien fertigungsgerechter Konstruktion; nach Expertenangaben existieren vergleichbare Versuche in den USA erst in jüngerer Zeit.

Zudem korreliert diese Situation mit einem weit verbreiteten innerbetrieblichen Aufstieg in die Konstruktionsabteilungen. Für den westdeutschen Werkzeugmaschinenbau ist es typisch, daß selbst die anspruchsvolleren Positionen über langjährige betriebliche Aufstiegsprozesse erreicht werden, die von einer Facharbeitertätigkeit Ausgang nehmen. Mit dem steigenden Anteil von Elektroingenieuren und Informatikern im Werkzeugmaschinenbau verbindet sich allerdings eine wachsende Bedeutung des "Seiteneinstiegs" in die gehobenen Positionen des technischen Personals (vgl. Wolf u.a. 1992, S. 107 ff.). Es ist jedoch davon auszugehen, daß der berufliche Aufstieg von Ingenieuren und Technikern durch ein längeres Verweilen in fertigungsnahen Bereichen keineswegs behindert, in vielen Fällen vermutlich sogar gefördert wird. Der hohe Einfluß und die Bedeutung von produktions- und praxiserfahrenen Maschinenbauingenieuren wird nicht zuletzt auch dadurch belegt, daß Positionen im höheren Management in Maschinenbaubetrieben relativ häufig mit Personen aus dieser Ingenieurgruppe besetzt werden.

Soweit die vorliegenden empirischen Befunde hierzu Aussagen zulassen, gilt diese Dominanz von Maschinenbauingenieuren in abgeschwächter Form auch für jene Bereiche in Elektrotechnischen Unternehmen, bei Computerherstellern und Software-Häusern, die sich mit fertigungstechnischer Entwicklung befassen. So waren die meisten Interviewpartner aus solchen Unternehmen Maschinenbauingenieure, die sich das erforderliche Informatikwissen entweder im Rahmen einer Spezialisierung ihres Studiums oder aber erst im Verlauf ihrer beruflichen Tätigkeit angeeignet hatten.⁹ In den USA hingegen waren die Interviewpartner sowohl in den Maschinenbaubetrieben als auch bei den Steuerungsherstellern ausnahmslos theoretisch ausgebildete Electrical Engineers.

9 Diese Befunde beruhen nicht nur auf der begrenzten Zahl von Expertengesprächen über die NC-Entwicklung, sondern basieren vor allem auf Erfahrungen aus weiteren technik- und industriesoziologischen Projekten des ISF München (z.B. Deiß, Hirsch-Kreinsen 1992).

In abgewandelter Form gelten diese Zusammenhänge auch für die ingenieurwissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsinstitute. Sie sind zum einen über ihren hohen Anteil industrieller Auftragsforschung eng mit den Anforderungen industrieller Praxis und Hersteller- und Anwendererfordernissen verflochten. Die Kooperationsbeziehungen zwischen FuE-Instituten und Herstellern, vor allem aus dem Werkzeugmaschinenbau, beruhen zum anderen auf engen personellen Beziehungen und Kontakten innerhalb der ingenieurwissenschaftlichen Communities (s.u.). Schließlich spielt bekanntermaßen der berufliche Werdegang von Maschinenbau-Professoren, der in der Regel erfolgreiche Karriereabschnitte in der Industrie voraussetzt, eine wichtige verbindende Rolle. Schon auf der Assistentenebene existieren zwischen FuE-Instituten und der Industrie enge personelle Kontakte, die über einen laufenden Personalwechsel von den Instituten in die Betriebe stabilisiert werden.

Entwicklungsarbeiten beziehen daher in hohem Maße Erfahrungswissen und industrielle Praxis ein, die allerdings durch wissenschaftliche Systematik strukturiert und theoretisch ergänzt werden. Obgleich seit langer Zeit spezielle Theorien und Regelwerke, die empirisches Wissen systematisieren, existieren und ständig weiterentwickelt werden - zu nennen sind beispielsweise Zerspanungstheorien, Theorien über dynamisches und thermisches Maschinenverhalten, Werkstoffforschung oder Konstruktionslehre (Kap. II, 4.) -, bleibt deren Einfluß bis heute bei betrieblichen FuE-Prozessen, folgt man dazu vorliegenden Befunden, relativ gering (z.B. Hubka 1991).

Gestützt und stabilisiert werden diese Bedingungen durch eine relativ ausgeprägte Ingenieur-Community, der sowohl Wissenschaftler als auch betriebliche Praktiker angehören. Institutionelle Kristallisationspunkte für diese einflußreiche Community sind zum einen die schon erwähnten Industrieverbände und professionellen Organisationen, zum anderen aber auch informelle Zusammenhänge und Kontakte, die beispielsweise auf gemeinsame Studienorte oder Hochschullehrer zurückgehen.¹⁰ Auf Dauer gestellt spielen diese Communities durch Verbände, Vereinigungen und formelle und informelle Arbeitskreise, die zur Entwicklung und Verbrei-

10 Durchaus selbstironisch sprechen manche Absolventen des Maschinenbaustudiums an der RWTH Aachen von der "Opitz-Mafia", der sie angehören und die ihnen vielfältige berufliche Kontakte ermöglichte.

tung einer bestimmten Technik gegründet wurden und denen gleichfalls Wissenschaftler und Praktiker angehören, eine nicht unwesentliche Rolle.

In Zusammenhang mit der NC-Entwicklung konstituierte sich beispielsweise bereits 1963 ein "Verbraucherkreis" aus Fachleuten von Anwender- und Herstellerbetrieben, der sich später als Unterausschuß "Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen" dem VDI anschloß. Der Einfluß dieses Kreises auf die Entwicklung von NC-Maschinen über die Festlegung von technischen Richtlinien und Normen "kann nicht hoch genug eingeschätzt werden" (Pirker u.a. 1970, S. 291). Ein weiteres Beispiel ist der EXAPT-Verein, der 1967 gegründet wurde und bis heute existiert. Seine Ziele richteten sich ursprünglich auf die wissenschaftliche Forschung, Entwicklung und Verbreitung von Programmiersprachen für NC-Maschinen. Zu den Mitgliedern dieses Vereins zählten damals NC-Anwender, NC-Hersteller, große Computerfirmen sowie vier Hochschulinstitute (ebd., S. 293).

Zwar richteten sich ihre Leitbilder vor allem in den 60er und 70er Jahren - ähnlich wie die vieler Ingenieure in den USA - auf die Realisierung möglichst weitreichend automatisierter technischer Systeme, die Diskussion um die "mannlose Fabrik" ist hierfür ein beredtes Beispiel (z.B. Spur 1984), jedoch waren diese Leitbilder immer rückgebunden an die Erfordernisse praktischer Anwendbarkeit neuer Techniken, vor allem im komplexen Maschinenbau, an denen sich die Vorstellungen einer weitreichenden Automatisierung sehr schnell brachen und relativiert werden mußten.

Vorherrschend sind bei dieser praxisorientierten Ingenieur-Community bis heute Leitbilder fertigungstechnischer Entwicklung, in deren Zentrum die Werkzeugmaschinenentwicklung steht. Sie umfassen eine große Spannweite unterschiedlicher Konzepte, die von der überaus breit einsetzbaren und standardisierten Universalwerkzeugmaschine bis hin zu - häufig auf Universalmaschinen basierenden - kundenspezifisch ausgelegten Spezialkonzepten reichen.¹¹ Als paradigmatisch für die deutsche Werkzeugmaschinenentwicklung können einerseits die konventionelle Spitzendrehbank als Universalwerkzeugmaschine, andererseits kundenspezifische Systeme wie Mehrspindeldrehautomaten angesehen werden (Mommertz 1981, S. 146 ff.). Im Vergleich zu den konventionellen Maschinenkonzepten aus den USA gelten die in der Bundesrepublik herge-

11 Insofern bezeichnen kundenspezifische Systemlösungen, die besonders in der letzten Zeit als Konkurrenzvorteil des bundesdeutschen Werkzeugmaschinenbaus hervorgehoben werden, einen zwar wichtigen, aber eben nur einen Pol der gesamten Entwicklungspalette (z.B. Frick 1991; Heller 1991).

stellten Werkzeugmaschinen als anspruchsvoll, innovativ und relativ teuer (March et al. 1989, S. 42 f.); anders als die amerikanischen Werkzeugmaschinen für die Flugzeug- und Rüstungsproduktion können sie hingegen als technisch und ökonomisch überaus flexibel angesehen werden.

b) Vorherrschende berufliche Reproduktion des technischen Personals¹²

Die Merkmale und Besonderheiten der Struktur des technischen Personals in Deutschland sind bekannt und vielfach beschrieben:¹³ Ausgegangen wird von einer beträchtlichen Homogenität eines im Prinzip vom Facharbeiter bis zum Diplomingenieur reichenden "qualifikatorischen Raums" (Maurice), der sich durch eine hohe vertikale Kontinuität und Durchlässigkeit im doppelten Sinn von beruflicher Mobilität und Zirkulation von Wissen und Erfahrung auszeichnet (Lutz, Veltz 1989, S. 273). Im Unterschied zu den USA umfaßt dieser Raum die verschiedenen, über Mobilitätsketten miteinander verschränkten Gruppen der Facharbeiter, Techniker, Fachschul- bzw. Fachhochschulabsolventen und Diplomingenieure. Der Erwerb ihrer technischen Kompetenzen basiert in hohem Maße auf industrieller und beruflicher Praxis.

Diese Grundstruktur hat sich bis heute erhalten, obgleich historisch eine fortschreitende Differenzierung insbesondere zwischen den verschiedenen Gruppen des mittleren und höheren technischen Personals - zwischen Technikern, Fachhochschulingenieuren und Hochschulingenieuren - stattfand. Vor allem differenzieren sich die Einsatzbereiche des technischen Personals in den Betrieben aus und beobachtbar sind, wie schon angeführt, die wachsende Bedeutung von Seiteneinstieg und schulischen Abschlüssen. Die Mobilität zwischen den verschiedenen Gruppierungen des technischen Personals ist jedoch nach wie vor sowohl innerbetrieblich als auch im Bildungssystem vorhanden und ist konstitutiv für die Ingenieurausbildung in Deutschland (König 1985). In den betrieblichen Einsatzbereichen

12 Im Unterschied zur schulischen Reproduktion des technischen Personals bezeichnet das berufliche Reproduktionsmuster Prozesse des Erwerbs technischer Kompetenzen, deren Schwerpunkt auf praktischer Tätigkeit und arbeitsalltäglichem Lernen liegt (Lutz, Veltz 1989, S. 240).

13 Vgl. hierzu z.B. zuletzt Lutz, Veltz 1989 sowie Maurice, Sorge 1990 und die dort angegebene Literatur.

des technischen Personals ist eine Hierarchie von sich überlappenden Fachkompetenzen und damit verbundenen Aufstiegswegen, die vom Facharbeiter in der Werkstatt über den Planer der Arbeitsvorbereitung, dem technischen Zeichner und Detailkonstrukteur bis hin zum Entwurfsingenieur reicht, relativ häufig anzutreffen; verschiedentlich sind sogar die Konstruktionschefs in Maschinenbaubetrieben ehemalige Facharbeiter, die allenfalls einige formale Zusatzqualifikationen erworben haben (Wolf u.a. 1992, S. 107 ff.).

In diesem Rahmen zeichnet sich die Ingenieurausbildung - je nach Ausbildungsgang verschieden - durch ein spezifisches Mischungsverhältnis von Theorie und Praxis aus. Dies gilt insbesondere für die Ausbildung von Maschinenbauingenieuren der verschiedenen Studienrichtungen. Ihre Ausbildung basiert einerseits auf der Vermittlung naturwissenschaftlicher und mathematischer Grundlagen, andererseits zeichnet sie sich aber durch praktisch-empirisch ausgerichtete Inhalte einschließlich praktischer Prinzipien von Maschinenkonstruktionen aus; theoretisches Wissen figuriert als Voraussetzung für die Lösung technischer Anwendungsprobleme. Die Grundstruktur der Ausbildungsgänge zeichnet sich dadurch aus, daß theoriebezogene Fächer und Inhalte sich in einem ersten Studienabschnitt konzentrieren und einen vergleichsweise großen Raum einnehmen, während die eher anwendungsbezogenen Fächer und Themen Hauptgegenstand der zweiten Studienphase sind. Diese Mischung von Theorie und Praxis gilt für universitär ausgebildete Ingenieure, aber auch für Fachhochschulingenieure, die als besonders typisch für die deutsche, praxisorientierte Ingenieurausbildung angesehen werden und die eine nach wie vor hohe Bedeutung für die technische Praxis haben.¹⁴ Zwischen den FH- und TH-Ingenieuren besteht daher in Hinblick auf Tätigkeiten und faktisch verfügbare Qualifikationen für weite Bereiche fachliche Gleichwertigkeit und daher auch Substituierbarkeit, von der die Betriebe regen Gebrauch machen (Lutz, Kammerer 1975).

Sozialstrukturelle Basis dieser engen Verschränkung von Wissenschaft und Praxis in der Struktur des technischen Personals ist eine quantitativ

14 Nicht zufällig bezieht sich daher die aktuelle ausbildungspolitische Diskussion über eine Aufwertung und einen Ausbau praktisch orientierter Ingenieurstudiengänge in den USA auf das System der deutschen Fachhochschulen (z.B. Kazis et al. 1989).

und qualitativ ausreichende Verfügbarkeit von qualifizierten Facharbeitern. Ohne Facharbeiter ist die Reproduktion des höheren technischen Personals durch Aufstieg aus der Praxis, wie das Beispiel der USA zeigt, im großen Maßstab kaum möglich. Im Gegensatz dazu sind in Deutschland bislang Facharbeiter ausreichend vorhanden, deren Kompetenzen und Erfahrungswissen Bezugsgröße aller anderen Gruppen des technischen Personals sind. Allein dadurch konnte sich eine Ingenieurausbildung an den deutschen Universitäten und insbesondere den Fachhochschulen mit klaren Bezügen auf die industrielle Praxis und den dort sich manifestierenden Problemen auf Dauer etablieren. Die Kompetenz der Ingenieure und ihre Fachrichtungsraster definieren sich weniger gemäß der Logik schulischen Wissenserwerbs, sondern weit stärker gemäß der besonderen und komplementären Rolle, die sie später in der beruflichen Praxis im Verhältnis zu anderen Gruppen des technischen Personals, insbesondere zu Facharbeitern, spielen. Die Qualifikation und berufliche "Kultur" von industrieller Facharbeit sind bis heute das unverzichtbare Fundament jener spezifischen Form technischer Kompetenz, die sich historisch in Deutschland herausgebildet hat (Lutz, Veltz 1989, S. 272 f.) und auf dem die spezifische Netzwerkstruktur des deutschen Innovationsmusters beruht.

4. Industrielle Ausrichtung des FuE-Systems

a) "Diffusionsorientierte" FuE-Politik

Politisch-institutionelle Voraussetzung für die enge Verschränkung industrieller und wissenschaftlicher Akteure bei der Technikentwicklung ist eine Form staatlicher FuE-Politik, die politikwissenschaftlich als "diffusionsorientiert" gefaßt wird (Gerybadze, Little International 1988; Ziegler 1989). Sie richtet sich auf eine Förderung gegebener industrieller Strukturen und eine Verbesserung der Innovationsfähigkeit der gesamten Industrie, ohne eigenständig Ziele zu setzen, Innovationen in eine bestimmte Richtung lenken zu wollen und die Innovationsressourcen auf ausgewählte Spitzentechniken zu konzentrieren. Charakteristisch sind Maßnahmen, die auf inkrementale Änderungen, die Abstimmung und Optimierung vorgegebener Strukturen und vor allem die Effizienz gegebener FuE-Einrich-

tungen zielen. Konkret bedeutet dies, daß staatliche FuE-Politik in Deutschland hauptsächlich auf die Komplementarität zur industriellen Forschung setzte. Dies wird vor allem am vergleichsweise geringen staatlichen Anteil an den gesamten FuE-Aufwendungen deutlich, der in den 60er und 70er Jahren im Unterschied zu den USA weit unter 50 % lag (Tab. 10). Demgegenüber weisen die industriellen FuE-Aufwendungen durchschnittlich weit höhere Werte auf als die in den USA.

Aufgrund der industriellen Orientierung der staatlichen FuE-Politik haben bis heute militärisch ausgerichtete FuE-Maßnahmen nicht jene strukturprägende Kraft wie die entsprechende Politik in den USA. So setzte die staatliche Förderung der Luft- und Raumfahrttechnik und der Kerntechnik erst relativ spät - Anfang der 60er Jahre - ein, und sie hatte zumindest im Verlauf der 60er Jahre ein begrenztes Volumen (Hirsch 1970, S. 173). Trotz der dann einsetzenden schnellen Steigerung dieser Ausgaben im Rahmen verschiedener Förderprogramme (OECD 1986) spielten sie bislang in quantitativer Hinsicht, wie die Zahlen in Tabelle 11 zeigen, eine nicht so gewichtige Rolle wie in den USA. Vielmehr fließt ein relativ großer Anteil der staatlichen FuE-Ausgaben zivilen Industriebereichen zu. Dabei ist aufgrund seiner industriestrukturellen Bedeutung der Maschinenbau ein wichtiger Adressat. Dies wird nicht zuletzt daran deutlich, daß der Maschinenbau insbesondere seit Beginn der 70er Jahre einen zwar schwankenden, doch ständig steigenden Anteil staatlicher FuE-Mittel erhielt, die zeitweise die Mittel, die der auch in der Bundesrepublik politisch protegierten Luft- und Raumfahrtindustrie zufließen, überstiegen (Tab. 12).

Diese bis heute, weitgehend unabhängig von wechselnden politischen Konstellationen und konkreten Zielen vorherrschende staatliche FuE-Politik läßt sich bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts zurückverfolgen, als die ersten Ansätze einer staatlichen Förderung von Forschung und Entwicklung erkennbar wurden. Sie steht in Zusammenhang mit einer staatlichen Politik, die seit mehr als 100 Jahren mit der industriellen Entwicklung eng verschränkt war.

Im Unterschied zu den USA fand die industrielle Entwicklung in Deutschland vor allem im 19. Jahrhundert mit massiver staatlicher Unterstützung statt, und es etablierte sich ein zeitweise enges Bündnis zwischen der aufkommenden Industrie und der staatlichen Bürokratie, das allerdings historisch von wechselnden Konstellationen geprägt war. Wesentlich ist jedoch, daß selbst in "liberalen" Pha-

sen, die durch eine staatliche Zurückhaltung bei direkten Eingriffen in den ökonomischen Prozeß gekennzeichnet waren, der Staat niemals vollends auf fördernde Maßnahmen verzichtete und von einem "Kontinuum bürokratischer Wirtschaftsförderung" im sich entfaltenden deutschen Kapitalismus gesprochen werden kann (Hirsch 1970, S. 11 ff.).

Jahr	Maschinenbau	Elektrotechnik	Luft- und Raumfahrt
1970	6,5	14,9	37,1
1975	8,5	27,2	28,6
1980	18,8	17,0	23,4
1982	26,7	11,5	24,0
1985	23,3	17,9	26,5
1986	18,3	20,9	27,4
1988	12,9	14,6	29,9
Quellen: BMFT, versch. Jahrgänge; BMFT: Faktenbericht 1990			
Tabelle 12	Anteile von Wirtschaftszweigen in der Bundesrepublik an den Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung (in %)		

Ein weiteres wichtiges Moment dieser Politik ist der staatlich geförderte Ausbau wissenschaftlich-technischer Einrichtungen; so wurde schon 1887 auf Betreiben der sich formierenden Elektrotechnischen Industrie die physikalisch-technische Reichsanstalt gegründet; 1911 folgte die Errichtung der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft, die heutige Max-Planck-Gesellschaft, und 1912 wurde die Deutsche Gesellschaft für Luftfahrt ins Leben gerufen (ebd., S. 31). Mit diesen Institutsgründungen wurden wichtige Voraussetzungen dafür geschaffen, Innovationsprozesse in der Industrie nicht nur dauerhaft zu unterstützen, sondern auch gesellschaftlich als wichtig erachtete FuE-Funktionen zu übernehmen, die aus Kostengründen von Privatunternehmen nicht wahrgenommen werden.

In der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg fand diese Politik ihren Ausdruck in der Gründung oder Wiedegründung einer ganzen Reihe von Organisationen, die für die Unterstützung und Koordinierung der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung in der Bundesrepublik von beträchtlicher Bedeutung waren. Neben vielen anderen Institutionen gelten hier beispielsweise die, schon angeführte, Gründung der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) wie auch die des Ra-

tionalisierungs-Kuratoriums der Deutschen Wirtschaft (RKW), das schon 1921 entstanden war, als typisch (Hack 1988, S. 11 ff.). Weiterhin kann die Einrichtung eines Bundesministeriums für Wissenschaftliche Forschung 1961 als wichtiger Schritt auf dem Wege der Institutionalisierung der spezifisch deutschen Form staatlicher FuE-Politik angesehen werden.

b) Große Bedeutung der Ingenieurwissenschaften

Eingebettet in diese Zusammenhänge war vor allem das Aufkommen der Ingenieurwissenschaften. Über ihren staatlich vorangetriebenen Ausbau spätestens seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts sollte vor allem der schnell wachsende Bedarf der Industrie an wissenschaftlich ausgebildeten technischen Fachkräften befriedigt werden.

Die Ingenieurwissenschaften sind damit Teil eines Wissenschaftssystems, das nicht wie in den USA überwölbt wird von "big science", deren Interessen auf bestimmte, hoch spezialisierte FuE-Schwerpunkte ausgerichtet sind. Das Wissenschaftssystem zeichnet sich trotz zweifellos vorhandener "Spitzeninstitute" durch ein relativ homogenes und breit gefächertes Niveau aus. Es existiert eine institutionalisierte, sich im Prinzip ergänzende, faktisch jedoch häufig überlappende Arbeitsteilung mit einer hohen Industrieorientierung: Während Grundlagenforschung in der Regel an Hochschulinstituten wie auch - hauptsächlich im Bereich der Naturwissenschaften - an Instituten der Max-Planck-Gesellschaft betrieben wird, richteten sich - Ende der 80er Jahre knapp 30 - Institute der Fraunhofer-Gesellschaft mehrheitlich auf angewandte und unmittelbar industriebezogene Forschung.¹⁵ Die Institute dieser 1949 gegründeten Gesellschaft wurden seit 1968 relativ schnell aus- und aufgebaut, um "die notwendige Brücke" zwischen der Grundlagenforschung und der industriellen Produktion zu schließen und damit einem wachsenden Interessen der Industrie an externen Forschungsressourcen, die bis dahin eher zufällig und wenig systematisch gewachsen waren, nachzukommen (BMFT 1969, S. 62).

¹⁵ Von den 1988 33 Forschungsinstituten der Fraunhofer-Gesellschaft wurden nur sechs Institute zu 100 % durch das Verteidigungsministerium gefördert (BMFT 1988, S. 289).

Eine wichtige Rolle für das Gewicht der Ingenieurwissenschaften im Wissenschaftssystem spielen schließlich auch die Fördermaßnahmen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die - im Unterschied zur vergleichbaren NSF in den USA - seit den 60er Jahren in steigendem Umfang Förderungsmittel für die Ingenieurwissenschaften und darunter wiederum Mittel für fertigungstechnische Grundlagenforschung bereitstellt (Hirsch 1970, S. 154 ff.). Neben einzelnen geförderten Projektvorhaben sind hierbei insbesondere umfangreichere Schwerpunktprogramme und Sonderforschungsbereiche von Bedeutung; so wurde ein erster fertigungstechnischer Sonderforschungsbereich 1969 an der Technischen Universität Berlin mit dem Titel "Produktionstechnik und Automatisierung" gegründet, in dessen Rahmen systematisch die damaligen Anwendungsmöglichkeiten der Computertechnologie für betriebliche Produktionsprozesse erforscht werden sollten. Diese Forschungsergebnisse flossen in spätere Entwicklungsmaßnahmen ein, die in der Regel industriefinanziert, unmittelbar anwendungsbezogenen Charakter hatten (Spur 1979, S. 425 ff.).

Daher kommt auch dem Maschinenbau im deutschen Wissenschaftssystem bis heute ein weit höheres Gewicht zu als der vergleichbaren Disziplin in den USA. Im Unterschied zu den USA gibt es in Deutschland eine ausgeprägte "Maschinenbaukultur" - so ein interviewter Experte.¹⁶ Die Eigenständigkeit des Maschinenbaus als wissenschaftliche Disziplin geht zurück auf die zweite Hälfte des letzten Jahrhunderts, spätestens seit den 20er Jahren kann von Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen als ingenieurwissenschaftliche Disziplin gesprochen werden. Unmittelbar damit verschränkt sind die Gründung und der Aufbau der später großen und renommierten fertigungstechnischen Institute, die sich heute in den USA kaum finden lassen.¹⁷ Ihre Einrichtung reicht in einigen Fällen bis zum Anfang dieses Jahrhunderts zurück, wobei die Institute von Anbeginn an eng - vor allem mit der Maschinenbauindustrie - zusammenarbeiteten (König 1985; Kap. II, 4.). Die ingenieurwissenschaftliche Fachrichtung des

16 Der berufliche Werdegang dieses Gesprächspartners ist typisch für die industrielle Orientierung der Ingenieurwissenschaften in der Bundesrepublik. Er war über lange Jahrzehnte hinweg nicht nur Konstruktionschef eines großen Werkzeugmaschinenherstellers, sondern zugleich auch Honorarprofessor an einem renommierten fertigungstechnischen Hochschulinstitut.

17 Der vorliegenden Literatur zufolge orientierte sich offenbar die Gründung der deutschen Institute an den Ende des letzten Jahrhunderts in den USA existierenden Maschinenbaulaboratorien vieler Universitäten (König 1985).

Maschinenbaus bildet neben der Fachrichtung Elektrotechnik den historischen "Kern" der Technischen Hochschulen. Diese Situation findet sich in Deutschland nicht zuletzt deshalb, weil im Unterschied zu anderen Ländern hier eine ausgeprägte Trennung und Statuskonkurrenz zwischen Universitäten und Technischen Hochschulen bestand und im Grunde bis heute besteht.

So wurden das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der Technischen Universität Berlin 1904 und das Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre an der Technischen Hochschule Aachen 1906 gegründet. Mit der Gründung des Berliner Instituts verband sich die in Deutschland erste Einrichtung eines Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetriebe im Rahmen der Abteilung für Maschinen-Ingenieurwesen der damaligen Königlich Technischen Hochschule Berlin. Erster Lehrstuhlinhaber wurde Georg Schlesinger, der zuvor Konstruktionschef bei der Maschinenbaufirma Ludwig Loewe war. Wichtigstes Arbeitsfeld Schlesingers war die wissenschaftliche Untersuchung des Zerspanvorgangs und die Weiterentwicklung von Werkzeugmaschinenkonzepten (Spur 1979, S. 279 ff.). Ähnliche Arbeitsfelder wurden von Anbeginn an am Aachener Werkzeugmaschinenlaboratorium (WZL) verfolgt (König u.a. 1988, S. C-65 ff.).

Neben diese beiden, sehr bald internationale Bedeutung gewinnenden Institute trat spätestens seit den 50er Jahren eine ganze Reihe weiterer universitärer Institute, zwischen denen ein überaus enger Kontakt besteht und die über ihre Fachgemeinschaft im engeren Sinn hinaus im Wissenschaftssystem über einen hohen Einfluß verfügen. Derzeit befassen sich ungefähr 20 Hochschulinstitute in der Bundesrepublik mit Fragen fertigungstechnischer Entwicklung. Forschungs- und Entwicklungsgegenstand aller dieser Institute sind fertigungsorientierte Grundlagenforschung sowie das weite Feld anwendungsbezogener Forschung. Besonderes Merkmal ist dabei ihre enge Verschränkung mit Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, deren Gegenstand anwendungsorientierte und industriebezogene Forschung und Entwicklung auf Gebieten wie Produktionsautomatisierung, Fertigungstechnologien und Verfahrenstechnik ist (BMFT 1988, S. 290 f.). In der Regel überlappen sich die Arbeitsfelder der Hochschul- und Fraunhofer-Institute, die Institutsleiter sind die Lehrstuhlinhaber an den Hochschulinstituten, und die verschiedenen Institute sind am gleichen Ort und "unter dem gleichen Dach" angesiedelt.

Ein weiteres Merkmal der fertigungstechnischen Institute sind ihre bundesweiten vielfältigen offiziellen und inoffiziellen Verbindungen, in deren Rahmen nicht zuletzt Forschungs- und Entwicklungsthemen ausgewählt,

abgestimmt und gegenüber Forschungsförderinstanzen durchgesetzt werden; zudem sind diese ingenieurwissenschaftlichen Einrichtungen eine wichtige institutionelle Stütze für die in der Bundesrepublik im Vergleich überaus einflußreichen Ingenieur-Communities. Aus amerikanischer Perspektive begründet sich in der engen Zusammenarbeit der verschiedenen Institute ein intensiver spezifisch deutscher "proposal development-review-consensus building process", den es in den USA überhaupt nicht gebe. Über diesen Prozeß würden Forschungsinteressen vereinheitlicht, und der in der Bundesrepublik hohe Einfluß der Ingenieurwissenschaften auf die FuE-Politik auf Dauer konsolidiert (March et al. 1989, S. 47).

VIII. Sozioökonomischer Umbruch und neue Anforderungen an die Fertigungstechnik

Die institutionellen Arrangements und die sozioökonomischen Bedingungen der fertigungstechnischen Entwicklung wandeln sich. Diese Wandlungsprozesse müssen in die Analyse miteinbezogen werden, sollen die Entwicklung und vor allem Weiterentwicklung von Fertigungstechnik hinreichend rekonstruiert und erklärt werden. Relevant wird diese Frage besonders in Zusammenhang mit dem seit den 70er Jahren in allen industriell-kapitalistischen Ländern beobachtbaren sozioökonomischen Umbruch, mit dem sich die vergleichsweise stabile "fordistische" Prosperitätskonstellation der Jahrzehnte davor ihrem Ende zuzuneigen begann.

1. Zur Elastizität von Innovationsmustern

Als wesentlich für den Fortgang fertigungstechnischer Entwicklung unter den Bedingungen gesellschaftlichen Wandels erweist sich die "Fähigkeit" eines Innovationsmusters, neue, durch sozioökonomischen Wandel induzierte Erfordernisse aufzunehmen und in adäquate Innovationen umzusetzen sowie ggf. Basisinnovationen "zuzulassen". Es ist jedoch davon auszugehen, daß die über dem Aufkommen einer bestimmten Technik sich etablierenden institutionellen Arrangements zu ihrer Verfestigung und Schließung neigen; ein Tatbestand, der sich hinter der Formel vom "anerkannten Stand der Technik" verbirgt (Knie 1991; Kap. II). Inwieweit unter diesen Bedingungen die Weiterentwicklung bestehender Techniken oder auch grundlegende technische Innovationen möglich sind, hängt im Lichte der voranstehenden Befunde von einer Reihe struktureller Eigenschaften eines Innovationsmusters ab:¹

1 Die in diesem Zusammenhang relevanten theoretischen Ergebnisse der sozio-ökonomischen Netzwerkforschung werden im Schlußkapitel (Kap. IX) aufgegriffen.

(1) Wichtig ist erstens, welche Ressourcen für eine Innovation mobilisiert werden können. Zu fragen ist, ob hierzu auf schon bestehende Ressourcen zurückgegriffen werden kann, und ob diese etwa in personeller, qualifikatorischer und zeitlich-finanzieller Hinsicht ausreichend sind, und ob die Strukturen des jeweiligen Innovationsmusters eine Mobilisierung neuer Ressourcen, von neuem Wissen, technischem Personal oder neuen Organisationen ohne allzugroße Friktionen erlauben.

(2) Dies verweist zweitens auf die Breite verfügbarer Lösungspotentiale, auf die zur Innovation bislang verfolgter Systeme zurückgegriffen werden kann. Es handelt sich dabei um in der Vergangenheit prinzipiell generierte, jedoch nicht weiterverfolgte Optionen oder auch Basisinnovationen technischer Entwicklung, die problemlos und schnell in technische Innovationen umgesetzt werden können.

(3) Wesentlich ist zum dritten die Flexibilität der institutionellen Arrangements eines Innovationsmusters, Innovationen zu generieren bzw. solche, etwa von "Außenseitern" entwickelte, mit dem gegebenen Stand der Technik abzustimmen und in den fortlaufenden Entwicklungsprozeß aufzunehmen. Bestimmend dafür sind unter anderem: der Grad der Geschlossenheit existierender Communities und die damit einhergehende Bereitschaft, neue Wissensbestände aufzunehmen und professionell abzusichern; die technische und ökonomische Abhängigkeit relevanter Entwicklergruppen von bisher hauptsächlich verfolgten Technikpfaden sowie die mögliche Dominanz mächtiger partikularer Anwenderinteressen. Es handelt sich dabei um Einflußfaktoren, die sich z.B. in Normenwerken, technischen Standards u.ä. oder auch in über lange Jahre hinweg festgeschriebenen Curricula der Ingenieurausbildung niederschlagen.

(4) Einen wesentlichen Einfluß haben schließlich die Form des Anwendungsbezugs fertigungstechnischer Entwicklung und die je eingespielten Entwickler-Anwender-Beziehungen, die die Abstimmung mit neuen Anwendungsproblemen und Anwenderinteressen ermöglichen müssen. Diese Abstimmungsleistung dürfte um so friktionsloser verlaufen, je breiter und heterogener der bis dahin dominante Anwendungsbezug und die damit verfolgten ebenso breiten oder flexiblen Technikkonzepte sind. Demgegenüber wird, so ist zu vermuten, eine über lange Zeit eingespielte Spezialisierung eines Innovationsmusters infolge der Dominanz mächtiger parti-

kularer Anwenderinteressen neuen technischen Lösungen eher entgegenstehen.²

Je nach Ausprägung dieser Zusammenhänge kann sich ein Innovationsmuster im Zeitablauf als mehr oder weniger innovations- und anpassungsfähig erweisen. Wohl nur in Ausnahmefällen und in besonderen historischen Phasen dürfte dabei die Situation eintreten, daß im Rahmen eines vorherrschenden Innovationsmusters überhaupt keine problemadäquaten Weiterentwicklungen oder Innovationen möglich sind. Von Bedeutung für den Verlauf von Technikentwicklung und damit auch für die Funktionsfähigkeit eines gegebenen Musters ist vielmehr, welcher zeitliche Entwicklungsvorlauf erforderlich ist, um benötigte fertigungstechnische Lösungen bereitzustellen und zu welchen Kosten die neuen Lösungen den potentiellen Anwendern verfügbar gemacht werden. Insbesondere bei sich schnell wandelnden sozioökonomischen Bedingungen und daraus resultierenden neuen Anforderungen an Fertigungstechnik können festgefügte und mit hohem Beharrungsvermögen versehene Entwickler-Anwender-Beziehungen zu inadäquaten technischen Lösungen führen. Denkbar ist die Situation, daß sich die fertigungstechnische Entwicklung für eine gewisse Zeit weit stärker an den internen Strukturen, Handlungsbedingungen und Interessen einer eingespielten und vorherrschenden Entwicklerkonstellation sowie den Strategien einiger weniger mächtiger Anwender orientiert als an neuartigen Anwendungsproblemen der industriellen Produktion insgesamt. Der in bestimmten historischen Phasen kompatible Zusammenhang zwischen den einzelnen Momenten eines Innovationsmusters fällt auseinander mit der Folge, daß die Bereitstellung erforderlicher fertigungstechnischer Lösungen zunehmend schwieriger wird und neue Entwicklerarrangements notwendig werden.

2. Wandel der industriellen Anwendungsbedingungen

Spätestens seit dem Ende der 70er Jahre begannen sich die Anwendungsbedingungen fertigungstechnischer Entwicklung nachhaltig zu wandeln,

2 Zu den Anpassungs- und Innovationsproblemen von Fertigungstechnik im Rahmen von Großunternehmen dominierten Entwickler-Anwender-Beziehungen vgl. zuletzt z.B. Döhl 1989.

und es kamen neue Anforderungen an die Entwicklung und den Einsatz von Fertigungstechnik auf. Grundsätzlich sollten durch weiterentwickelte und neue Fertigungstechniken zugleich eine höhere Produktivität und erweiterte Flexibilität der Produktionsprozesse erreicht werden. Begleitet war dieser Wandel der Anwendungserfordernisse von einer bekanntermaßen geradezu rasanten Entwicklung der Mikroelektronik und für Fertigungstechnik nutzbaren Computertechnologie, wodurch sich in vielerlei Hinsicht neue fertigungstechnische Anwendungsmöglichkeiten eröffneten und die bis dahin vorhandenen Grenzen der industriellen Nutzbarkeit von EDV begannen sich immer weiter hinauszuschieben.

Die sich wandelnden Anwendungserfordernisse sind Resultat der allgemeinen Umbruch- und Krisensituation der industriell-kapitalistischen Länder. Ohne auf die grundlegenden Ursachen der Krise an dieser Stelle eingehen zu können, sei auf maßgebliche, bekannte und vielfach diskutierte Einflußfaktoren dieser Situation verwiesen (z.B. Piore, Sabel 1985, S. 185 ff.; Bechtle, Lutz 1989, S. 12 ff.; Herrigel 1990, S. 655 ff.): zum einen die zunehmende Verknappung natürlicher Ressourcen, die auf ihre im industriellen Maßstab schonendere und sparsamere Verwendung drängt; zum anderen Strukturverschiebungen auf den Arbeitsmärkten mit teilweise erheblichen Veränderungen bisheriger arbeitspolitischer Konstellationen und drittens, als zentraler Einflußfaktor, nachhaltige Umbrüche auf den Absatzmärkten, die als Globalisierung, Fragmentierung und zunehmende Sättigung und Instabilität begriffen werden (Lutz 1984).

Alle diese Faktoren lassen sich mit den herkömmlichen Formen der Massenproduktion zunehmend schwerer vereinbaren. Für die Entwicklung und den Einsatz von Fertigungstechnik hatte dies nachhaltige Konsequenzen. Auf der einen Seite verschoben sich die bisherigen, hauptsächlich am Erfordernis möglichst hoher Produktivität orientierten Anwendungsprobleme und -interessen vieler Industriebetriebe der Massenfertigung in Richtung der Bewältigung steigender Anforderungen an Innovativität, Flexibilität und Qualität. Auf der anderen Seite traten mittlere und kleinere Betriebe aufgrund ihrer wachsenden ökonomischen Bedeutung und drängenderen Rationalisierungsanforderungen mit neuartigen Anwendungsproblemen und -interessen den Herstellern von Fertigungstechnik gegenüber. Es wurde erforderlich, die fertigungstechnische Entwicklung auf neuartige Anwendungsprobleme abzustellen und die bislang verfolg-

ten fertigungstechnischen Konzepte weiterzuentwickeln und den neuen Erfordernissen anzupassen.

Die erforderlichen fertigungstechnischen Innovationen werden seit dem Ende der 70er Jahre mit dem Schlagwort "flexible Automatisierung" umschrieben. Ein Schwerpunkt war die Entwicklung komplexerer, aber möglichst leicht und kostengünstig einsetzbarer Systeme, die eine Flexibilisierung der bisherigen konventionell und starr automatisierten Fertigungstechniken wie Transferstrassen ermöglichen sollten; typisch hierfür sind die in den 80er Jahren auf den Markt gebrachten kleinen multifunktionalen Fertigungssysteme und Fertigungszellen (Schulz 1986) oder aber die Weiterentwicklung von Bearbeitungszentren in Richtung einer kostengünstigen und technisch-organisatorisch problemlosen Einsetzbarkeit. Ein weiterer Schwerpunkt war die forcierte Entwicklung möglichst einfacher, weniger komplexer und leicht einsetzbarer, häufig einfunktionaler CNC-Maschinen. Insofern ging es zunächst um die Erweiterung von im Prinzip bislang schon verfolgter Entwicklungskonzepte, deren Basis die umfassende Nutzung der CNC-Technik war. Spätestens in der zweiten Hälfte der 80er Jahre gewinnen jedoch über den engeren Bereich von Fertigungstechnik hinausgehende Software-Systeme wachsende Bedeutung für die Rationalisierung metallbearbeitender Produktionsprozesse (s. unter 5.).

Die Reaktionen auf diesen Wandel waren in den USA und der Bundesrepublik sehr verschieden. Während sich für das marktbezogene Innovationsmuster der Bundesrepublik keine gravierenden Anpassungsprobleme ergaben, entstanden für die eingespielten amerikanischen FuE-Muster erhebliche Probleme.

3. Angepaßte Weiterentwicklung von Fertigungstechnik in der Bundesrepublik

Fraglos stand der westdeutsche Werkzeugmaschinenbau seit spätestens Ende der 70er Jahre unter einem verschärften Innovationsdruck, und er war gezwungen, Konzepte flexibler Automatisierung zu entwickeln und entsprechende Maschinen wie auch Maschinensysteme anzubieten. Einen Hinweis auf das wachsende Anwenderinteresse an solchen Systemen geben die Befunde einer ingenieurwissenschaftlichen Untersuchung in der

Bundesrepublik (Kunerth u.a. 1976), wonach schon Mitte der 70er Jahre gerade auch bei vielen kleineren und mittleren Betrieben ein hohes Interesse am Einsatz von NC-Maschinen bestand. Ein Großteil dieser potentiellen Anwender hatte bis dahin jedoch aufgrund des hohen technischen, organisatorischen und damit verbundenen ökonomischen Aufwandes der damals hauptsächlich verfügbaren Systeme von einer Investition in diese Technik Abstand genommen.

Diese sich wandelnden Anwendungsprobleme und Anwendungsinteressen wurden zwar nicht ohne Probleme (z.B. Rossnagel 1983), doch - wie vor allem amerikanische Experten immer wieder hervorheben (z.B. Ashburn 1988, S. 80) - im Vergleich zu den USA relativ schnell in das vorherrschende Innovationsmuster aufgenommen und vom Werkzeugmaschinenbau in entsprechende technische Lösungen umgesetzt. Vor allem zeigte dies die westdeutsche NC-Technik mit ihrem Entwicklungssprung in Richtung einer deutlich erhöhten Einsatzflexibilität seit der zweiten Hälfte der 70er Jahre. Auf der Basis der NC-Technik wurde darüber hinaus in dieser Phase aber eine Reihe weiterer fertigungstechnischer Innovationen, die von neuen Maschinenkonzepten wie weiterentwickelten Bearbeitungszentren, flexiblen Fertigungszellen bis hin zu Systemlösungen der verschiedensten Art reichen, vorangetrieben (z.B. Schulz 1981; VDI-Nachrichten 32/1984, S. 10). Ökonomisch verband sich damit bis zum Ende der 80er Jahre eine sehr stabile Position des deutschen Werkzeugmaschinenbaus:³ So erlitt diese Branche in der Krise zwischen 1979 und 1985 zwar einen Beschäftigungsrückgang von ca. 100.000 auf ca. 88.000 Beschäftigte, doch stieg danach die Beschäftigung um fast den gleichen Anteil wieder an, bis sie 1990 mehr als 100.000 erreichte, um in der dann beginnenden Krise allerdings wieder deutlich abzufallen (Tab. 13). Die Zahl der in der Bundesrepublik produzierten NC-Maschinen nahm deutlich zu; allein in der ersten Hälfte der 80er Jahre verzeichnete sie einen deutlichen Sprung von

3 Nicht weiter betrachtet wird die wirtschaftliche Krise seit 1990/91, von der der Werkzeugmaschinenbau massiv betroffen wurde. Seitdem wird sehr intensiv die Frage diskutiert, ob durch diese Konjunkturkrise strukturelle Konkurrenzschwächen der Branche offenbar werden (z.B. Brödner, Schultetus 1992; Clever 1992). Fraglos trifft dies für die ökonomische Seite der Branchensituation zu - verwiesen sei etwa auf die im internationalen Vergleich geringe Produktivität und Kapitalrentabilität. Doch legen nicht zuletzt die Befunde der vorliegenden Untersuchung die Annahmen nahe, daß bislang jedenfalls kaum von gravierenden technischen Innovationsproblemen des deutschen Werkzeugmaschinenbaus ausgegangen werden kann (s. unter 5.).

Jahr	USA	BRD
1958	75,4	85,5
1960	81,2	103,0
1965	96,3	115,0
1970	100,2	125,0
1971	-	120,0
1972	80,7	113,0
1973	92,1	112,0
1974	96,8	111,5
1975	88,0	102,0
1976	85,4	97,0
1977	88,5	99,0
1978	95,9	98,5
1979	104,3	100,0
1980	108,0	100,0
1981	104,4	99,0
1982	85,9	94,6
1983	69,1	84,0
1984	73,9	83,0
1985	73,0	88,0
1986	68,6	93,0
1987	63,4	93,5
1988	66,1	94,0
1989	73,0	97,5
1990	65,7	103,0
1991	59,5	98,0
1992	-	89,5
Quellen: NMTBA, versch. Jahrgänge; AMT 1992; VDMA, versch. Jahrgänge		
Tabelle 13	Beschäftigung im Werkzeugmaschinenbau in den USA und in der BRD (in Tausend)	

ca. 3.000 Stück 1980 auf mehr als 10.000 Stück 1984 (Tab. 1). Schließlich lag der Anteil des westdeutschen Werkzeugmaschinenbaus an der Weltproduktion von Werkzeugmaschinen Ende der 80er bis in die 90er Jahre

hinein nach dem Japans an zweiter Stelle, und er hatte die weitaus höchste Exportquote (Tab. 14).

Resümiert man die Grundstrukturen des deutschen Innovationsmusters, so läßt sich seine Anpassungsfähigkeit vor allem auf den seit jeher breiten Absatzmarkt und Anwendungsbezug zurückführen. Die vorherrschenden Anwendungsbedingungen von Fertigungstechnik änderten sich durch das Aufkommen neuer Probleme und Anwenderinteressen nicht dramatisch; vor allem aufgrund der ausgeprägten Weltmarktorientierung zeichnete sich das Innovationsmuster seit jeher durch eine hohe marktbezogene Elastizität aus. Dies betraf sowohl die Weiterentwicklung der aufwendigen kundenspezifischen Systemlösungen als auch die Entwicklung einfacherer, flexibel anwendbarer Werkzeugmaschinen. Wie skizziert, konnte der Werkzeugmaschinenbau - anknüpfend an eingespielte Beziehungen einiger größerer Werkzeugmaschinenhersteller zu kleinbetrieblichen Anwendern - dem wachsenden Bedarf an einfacheren, CNC-gesteuerten Universalwerkzeugmaschinen nachkommen, so daß dieses Feld nicht wie in den USA ausschließlich durch wachsende Importe abgedeckt werden mußte. Voraussetzung für diese Entwicklungsschritte waren zweifelsohne die relativ schnell mobilisierbaren Innovationsressourcen des westdeutschen Werkzeugmaschinenbaus:⁴

(1) Die Hersteller konnten auf eine breite Palette technischer Konzepte sowie bis dahin nicht vollständig ausgeschöpfter Entwicklungsoptionen zurückgreifen. Im Fall der NC-Technik umfaßten diese vor allem die bis ungefähr Mitte der 70er Jahre nur als Seitenpfad der Entwicklung anzusehenden werkstattorientierten Steuerungssysteme. Obgleich von nur nachgeordneter Bedeutung, waren solche Systemkonzepte bis dahin mehr oder weniger kontinuierlich verfolgt worden, so daß viele Entwickler über aus-

4 In Zusammenhang mit der Krise des Werkzeugmaschinenbaus seit 1990/91 werden die Absatzprobleme dieser Branche verschiedentlich auf die Über-technisierung seiner Produkte zurückgeführt (z.B. Brödner, Schultetus 1992). Im Vergleich zu den vor allem aus Japan importierten Standardmaschinen ist dies vermutlich in vielen Fällen nicht von der Hand zu weisen. Doch darf diese Kritik nicht überzogen werden: Denn einmal betrifft dies hauptsächlich nur ein bestimmtes Spektrum von Maschinenkonzepten. Zum anderen ist zu sehen, daß sich mit der in dieser Perspektive teilweise zu hohen Technisierung zugleich jenes ingenieurwissenschaftliche Know-how verbindet, das in der Vergangenheit, wie gezeigt, zentrale Voraussetzung der Innovationsfähigkeit der Branche war und das auch in Zukunft unverzichtbar sein wird.

	1968	1972	1976	1980	1985	1989	1990	1991	1992
USA									
Anteil an der Weltproduktion, %	26,3	14,2	16,3	18,2	12,4	7,8	7,7	7,6	9,2
Exportanteil an der Inlandsproduktion, %	12,6	18,8	23,6	15,3	19,8	23,9	30,6	27,5	31,5
Importanteil am Inlandsverbrauch, %	9,8	10,0	16,4	23,3	43,4	46,5	48,9	45,4	43,7
Produktion (\$ Mio.)	1.722,8	1.269,3	2.178,2	4.812,4	2.717,8	3.393,8	3.471,8	3.266,0	3.187,0
Anteil am Welt-export, %	10,0	7,6	8,5	7,3	4,7	5,0	5,0	4,8	5,9
BRD									
Anteil an der Weltproduktion, %	12,0*	15,0*	18,3	17,9	14,5	16,3	19,3	20,6	22,7
Exportanteil an der Inlandsproduktion, %	68,3	55,7	70,2	62,6	62,2	61,6	57,4	57,7	59,8
Importanteil am Inlandsverbrauch, %	21,4	22,1	27,7	32,8	23,3	37,7	33,1	38,2	37,4
Produktion (\$ Mio.)			2.450,0	4.750,0	3.168,6	7.929,8	8.734,3	8.841,9	7.852,0
Anteil am Welt-export, %	28,9	27,4	28,5	24,8	20,3	22,9	23,6	27,2	27,8
JAPAN									
Anteil an der Weltproduktion, %	7,5	7,5	7,9	14,5	24,3	23,3	24,2	26,5	25,1
Exportanteil an der Inlandsproduktion, %	10,6	13,4	34,9	37,9	41,1	37,6	36,4	34,2	41,0
Importanteil am Inlandsverbrauch, %	18,6	12,2	9,3	8,5	6,6	6,6	8,6	8,0	9,9
Produktion (\$ Mio.)	488,9	675,6	1.058,9	3.830,3	5.316,7	8.257,5	10.945,3	11.638,7	8.671,3
Anteil am Welt-export, %	3,6	7,6	7,2	13,2	22,6	19,9	18,7	21,2	21,0
* geschätzte Werte nach NMTBA 1982, S. 162									
Quellen: NMTBA, versch. Jahrgänge; AM, Februar 1992; März 1993; eigene Berechnungen									
Tabelle 14	Entwicklung des Werkzeugmaschinenbaus in den USA, der BRD und Japan								

reichendes Know-how und technische Konzepte verfügten, um werkstatt-orientierte Systeme innerhalb relativ kurzer Zeit zur Marktreife entwickeln zu können. Begünstigt wurden diese Entwicklungsanstrengungen durch das in Deutschland verfolgte breite Spektrum sehr unterschiedlicher und aufgrund ihrer Universalität an die verschiedensten Bedingungen anpassungsfähiger Werkzeugmaschinenkonzepte.

(2) Der Werkzeugmaschinenbau begann relativ frühzeitig in den 80er Jahren spezialisierte Informatik- und Elektronikbereiche aufzubauen und qualifiziertes elektrotechnisches Personal einzustellen (VDMA 1988; Wolf u.a. 1992, S. 107 ff.). Auch wurden verschiedentlich kleinere Software-Unternehmen von Werkzeugmaschinenherstellern aufgekauft. Dieser Trend hält bis heute an, so daß der Werkzeugmaschinenbau über ständig wachsende interne Ressourcen für mikroelektronisch basierte Innovationen verfügt.

(3) Zugleich wurde das seit jeher existierende Netzwerk zwischen den verschiedenen industriellen und nicht-industriellen Entwicklern ausgebaut und so die Ressourcen - vor allem an technologischem Know-how - vermehrt. Neben den Kontakten zu wissenschaftlichen Instituten spielen dabei kooperative Beziehungen zu Steuerungs- und Elektroniklieferanten wie auch neuerdings Software- und System-Häusern eine zunehmend wichtigere Rolle (Maurice, Sorge 1990, S. 22 f.). Im Vergleich zu den USA wird in diesen Kooperationsbeziehungen eine wesentliche Ursache für die Innovations- und Konkurrenzfähigkeit des westdeutschen Werkzeugmaschinenbaus gesehen (z.B. Herrigel 1988, S. 43 ff.; March et al. 1989, S. 41 ff.).

Diese Innovationsbedingungen basieren nicht nur auf den spezifischen Bedingungen des Ausbildungs- und des Wissenschaftssystems, sondern es erwiesen sich das nach wie vor geringe Gewicht des militärischen Sektors und verwandter High-Tech-Bereiche als innovationsbegünstigend. Von ihnen gingen bislang kaum Anforderungen aus, die die fertigungstechnische Entwicklung, wie in den USA, in eine Richtung zunehmender Komplexität und Spezifität drängten. Von besonderer Wichtigkeit ist zudem die "diffusionsorientierte" Ausrichtung der staatlichen FuE-Politik, durch die offensichtlich bislang nicht in nennenswertem Umfang Ressourcen aus zivilen Bereichen - wie etwa aus dem Maschinenbau - abgezogen und für Spitzeninnovationen gebündelt wurden. Damit waren im Gegensatz zu

den amerikanischen Entwicklern die strukturellen Voraussetzungen gegeben, die Potentiale der Mikroelektronik systematisch und gezielt für ihre breite fertigungstechnische Anwendbarkeit nutzen zu können. Wohl treffend ist daher auch die Bemerkung eines interviewten ehemaligen Konstruktionsleiters eines Werkzeugmaschinenbetriebs, wonach in der Entwicklungsphase der späten 70er und frühen 80er Jahre der bis dahin als üblich angesehene und allgemein akzeptierte Entwicklungsstand im Werkzeugmaschinenbau überschritten wurde und relativ schnell und ungehindert neue Konzepte gefunden werden konnten.

4. Innovationsschwäche in den USA

a) Niedergang des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus

Im Zuge des sozioökonomischen Umbruchs begannen sich auch in den USA die Anforderungen an die NC-Technik wie die Fertigungstechnik generell zu wandeln und erforderlich wurden zunehmend flexibel nutzbare, kostengünstig automatisierte und zuverlässig einsetzbare Anlagen und Systeme. Vor allem hing dies mit dem offenbar schnellen Bedeutungszuwachs kleinerer Betriebe und Kleinstbetriebe zusammen, die moderne Techniken nachzufragen begannen (z.B. Noble 1984, S. 213; Piore, Sabel 1985, S. 268 ff.). Wie interviewte Experten ausführten, öffnete sich ab Ende der 70er Jahre in den USA ein als "job shop market" bezeichnetes Anwendungsfeld von Klein- und Kleinstbetrieben für NC-Maschinen, das bis dahin für die Entwicklung und den Einsatz moderner Fertigungstechniken so gut wie keine Rolle spielte. Konzentrierte sich bis dahin der Einsatz von NC-Maschinen nahezu ausschließlich in Großbetrieben, so verbreitete sich in den 80er Jahren diese Technik zunehmend auch in kleineren Betrieben (March et al. 1989, S. 16).

Wie schon bei der Beschreibung der NC-Entwicklung angedeutet, paßte sich die fertigungstechnische Entwicklung in den USA diesen sich wandelnden Anforderungen kaum oder nur sehr zögernd an; vor allem flexibel einsetzbare, wenig komplexe und nicht sehr teure NC-Maschinen wurden von den amerikanischen Herstellern nicht in dem erforderlichen Umfang auf den Markt gebracht. Es entstand ein Angebotsdefizit, das ausländi-

sche, vor allem japanische Werkzeugmaschinenhersteller nutzten. Der Importanteil am gesamten inländischen Verbrauch von Werkzeugmaschinen erhöhte sich in den 80er Jahren ständig, und der amerikanische Werkzeugmaschinenbau geriet in eine Abwärtsspirale.

Die amerikanische Werkzeugmaschinenindustrie war bis zum Anfang der 70er Jahre weltweit führend: In den 60er Jahren war sie mit einem Anteil an der Weltproduktion von Werkzeugmaschinen von teilweise deutlich mehr als 20 % der größte Werkzeugmaschinenproduzent; 1968 belief sich ihr Anteil auf rd. 26 % gegenüber ca. 12 % der entsprechenden Branche der Bundesrepublik und ca. 7,5 % der japanischen Werkzeugmaschinenindustrie. In den 50er und 60er Jahren war die amerikanische Werkzeugmaschinenindustrie neben der Schweiz mit Abstand der größte Werkzeugmaschinenimporteur in die Bundesrepublik, zeitweilig lag der Importanteil bei über 30 %. Hingegen sank der Anteil des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus an der Weltproduktion von Werkzeugmaschinen in den 80er Jahren unter 10 % (Tab. 14), und der Anteil an den Werkzeugmaschinenimporten in die Bundesrepublik verringerte sich bis 1992 auf 5 % (Tab. 5). Die sich allein in diesen Zahlen ausdrückende Krise wurde Anfang der 80er Jahre offenkundig, als sich die Branche von einem weltweiten Konjunktureenbruch nicht mehr erholte. Freilich waren schon in den Jahren davor Anzeichen, die auf einen Wandel hindeuteten, erkennbar. Beispielsweise verband sich mit der fortschreitenden Globalisierung des Marktes für Fertigungstechniken - 1968 wurden ca. 29 %, 1981 mehr als 40 % der weltweiten Werkzeugmaschinenproduktion exportiert (CMT 1983, S. 24) - ein kontinuierlicher Rückgang des amerikanischen Anteils am Weltexport von Werkzeugmaschinen; während dieser Anteil am Weltexport 1975 noch bei mehr als 8 % lag, sank er bis zum Beginn der 90er Jahre auf rd. 5 %.

Der Importanteil am gesamten inländischen Verbrauch von Werkzeugmaschinen und Anlagen hingegen stieg beträchtlich: von rd. 16 % 1976 auf mehr als 45 % zu Beginn der 90er Jahre (Tab. 14). Seit 1977 weist der Export-Import-Saldo für Werkzeugmaschinen zunehmend größere Negativwerte auf. Dabei nahm insbesondere der Anteil der Importe aus Japan am Gesamtimport weit überdurchschnittlich - von ca. 11 % 1970 auf rd. 50 % Ende der 80er/Anfang der 90er Jahre - zu. Demgegenüber reduzierte sich der Anteil der Werkzeugmaschinenimporte aus Westdeutschland von rd. 35 % 1970 auf 17 - 20 % Anfang der 90er Jahre (Tab. 15).

Dabei verzeichneten die westdeutschen Importe wertmäßig jedoch eine leichte Steigerung (NMTBA 1990, S. C-1).

	aus der BRD	aus Japan
1961	38,3	0,9
1965	34,5	8,2
1970	35,4	11,2
1976	29,3	21,4
1980	18,2	37,9
1985	14,3	49,1
1987	16,6	53,2
1990	17,1	46,4
1991	20,4	46,4
Quellen: NMTBA, versch. Jahrgänge; AMT 1992; eigene Berechnungen		
Tabelle 15	Import von Werkzeugmaschinen aus der BRD und Japan in die USA; Anteil am Gesamtimport von Werkzeugmaschinen in %	

Die Importe umfaßten vor allem CNC-gesteuerte Drehmaschinen und Bearbeitungszentren aus Japan und neuerdings weiteren asiatischen Ländern wie Taiwan und Korea. Es handelte sich dabei um wenig komplexe und sehr kostengünstige computergesteuerte Universalmaschinen. Die Importe aus Westeuropa, insbesondere der Bundesrepublik wie auch der Schweiz, umfaßten hauptsächlich kundenspezifisch hergestellte Präzisionsmaschinen und kleinere Maschinensysteme, die schon in den 70er Jahren in größerem Umfang importiert wurden (March et al. 1989, S. 4, S. 86).

Diese Marktveränderungen waren von einem deutlichen Prozeß der Schrumpfung des US-Werkzeugmaschinenbaus seit Anfang der 80er Jahre begleitet. Zwischen 1980 und 1985 halbierte sich die Produktion von Werkzeugmaschinen nahezu, und die Beschäftigtenzahlen der Branche sanken von rd. 108.000 1980 auf knapp 60.000 Beschäftigte 1991. Dabei weisen die Beschäftigtenzahlen im amerikanischen Werkzeugmaschinenbau weit höhere Schwankungen auf als die vergleichbaren Zahlen dieser Branche in Westdeutschland (Tab. 13). Ein konjunktureller Auf-

schwung in der zweiten Hälfte der 80er Jahre konnte diese Entwicklung nicht umkehren, sie wurde bestenfalls abgemildert (March et al. 1989).

Dieser Niedergang betraf allerdings hauptsächlich die Masse jener Werkzeugmaschinenhersteller, die - eingebettet in die Strukturen des zivilen Innovationsmusters - Produkte für die Großanwender der Massenproduktion herstellten. Begleitet war diese Entwicklung von einem sich beschleunigenden Konzentrationsprozeß. Weniger betroffen waren die Großhersteller, die für die Rüstungsindustrie Maschinen entwickelten und produzierten. Dies zeigt sich deutlich an den Ende der 80er Jahre noch existierenden Konzernen des Werkzeugmaschinenbaus, von denen die Unternehmen Cross & Trecker, Cincinnati Milacron, Giddings & Lewis und Ingersoll Milling Machine die größten sind (March et al. 1989, S. 90; VDI-Nachrichten 43/1990, S. 8).⁵ Einen größeren Teil ihres Umsatzes bestreiten diese Hersteller, wie interviewte Experten immer wieder ausführten, mit Anwendern aus den "High-Tech"-Bereichen.

Typisch ist das Produktionsprogramm eines dieser großen Werkzeugmaschinenhersteller. Den Angaben interviewter Managementvertreter zufolge umfaßte es Ende der 80er Jahre zu etwa 45 % Transferlinien für die Fertigung von Motoren, Landwirtschaftsmaschinen und verwandten Produkten, 25 % Großwerkzeugmaschinen, die zu größeren Teilen in die Rüstungsindustrie gingen, und 30 % Sondermaschinen, z.B. für die Bearbeitung von Flugzeugtragflächen.

Diese Gesamtsituation des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus wird von March u.a. als "Kollaps" bezeichnet (1989, S. 8). Neben der mangelnden Innovationsfähigkeit wird als wichtiger Grund für die Krise die kurzfristige "Business-Orientierung" angeführt. Verwiesen wird dabei auf die geringe Investitionsneigung infolge der kurzfristigen Profitorientierung, die Vernachlässigung von Lieferfähigkeit und Qualität der Produkte und die hohe Rate von ausschließlich profitmotivierten Firmenübernahmen und Aufkäufen, weitgehend ohne Rücksicht auf die Sicherung des technologischen Know-hows und der Innovationsfähigkeit der Betriebe (z.B. Ashburn 1988; Herrigel 1988; March et al. 1989).

Ausschließlich an kurzfristigen Profiterwartungen orientierte Firmenaufkäufe durch branchenferne Investoren und ihr anschließendes "Ausschlachten" trieb offensichtlich in den 70er und 80er Jahren eine ganze Reihe zuvor renommierter

5 Im Jahr 1991 fusionierten die beiden Großhersteller Cross & Trecker und Giddings & Lewis (New York Times, June 11/1991, S. C1).

Werkzeugmaschinenfirmen in den schnellen Ruin; besonders gravierende und daher bekannt gewordene Fälle dieser Art sind beispielsweise der Niedergang der Werkzeugmaschinenhersteller Burgmaster und Lodge & Shipley (Holland 1989; Moritz 1992).

Zusammenfassend werden die Gründe für den Niedergang des US-Werkzeugmaschinenbaus in drei miteinander zusammenhängenden Faktorenbündeln gesehen: "cyclicality, fragmentation and parochialism, and low rates of product and process innovation" und "the roots of the problem are deep within the infrastructure of post-war American manufacturing, education, and culture" (March et al. 1989, S. 9). Bezeichnet werden damit die strukturellen Anpassungsprobleme der amerikanischen Innovationsmuster an die veränderten industriellen Erfordernisse.

b) Defizite des zivilen Innovationsmusters

Das zivile Innovationsmuster entstand aus den Funktionserfordernissen der amerikanischen Massenproduktion, und die erforderlichen Fertigungstechniken wurden zuverlässig bereitgestellt. Die Eigentümlichkeiten dieses Musters erschwerten es offensichtlich jedoch, sich wandelnde Anforderungen an fertigungstechnische Entwicklung zu integrieren und die bisher verfolgten Systemkonzepte und Lösungen entsprechend weiterzuentwickeln und anzupassen. Dabei ging es nicht nur um die Weiterentwicklung und Innovation der NC-Technik, sondern um die Innovation von Werkzeugmaschinen generell. Die bisherigen Vorteile dieses Musters wurden unter den neuen Erfordernissen an Fertigungstechnik zu Nachteilen. Sie lassen sich auf das Zusammenspiel von mehreren Faktoren zurückführen:

Ein wichtiges Moment war fraglos der geringe Innovationsdruck der dominanten Großanwender aus den Industrien der zivilen Massenproduktion; die sich wandelnden Interessen kleiner und mittlerer Anwender, insbesondere die der "job shops", hatten - wie seit jeher - einen nur nachgeordneten Einfluß auf die fertigungstechnische Entwicklung. So bezeichnen March u.a. in der MIT-Studie insbesondere den "weak user pull" der Automobilindustrie als wichtige Ursache für die wenigen fertigungstechnischen Innovationen der Mehrheit der Betriebe des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus (1989, S. 15). Wie skizziert, richtete sich über lange Jahrzehnte hinweg das Hauptinteresse dieser Anwender lediglich auf den regelmäßigen Ersatz vorhandener konventioneller Techniksysteme, kaum jedoch auf ihre Weiterentwicklung und schon gar nicht auf ihre grundle-

gende Innovation. Für die Produktions- und Absatzbedingungen des Modells der Massenproduktion waren diese Investitionsstrategien angemessen. Die daneben benötigten Präzisions- und Speziallösungen technischer Anlagen wurden aus Westeuropa, der Schweiz oder der Bundesrepublik importiert.

Diese geringe Innovationsneigung der großen amerikanischen Metallbetriebe änderte sich aber offensichtlich selbst unter verschärften Konkurrenzbedingungen nur sehr zögernd. Dem Druck auf Anpassung und Veränderung kam, wie einschlägige Analysen ausweisen (z.B. Piore, Sabel 1985, S. 217 ff.; Dertouzos et al. 1989, S. 171 ff.), die amerikanische Industrie seit dem Ende der 70er Jahre nur sehr langsam und unvollkommen nach. So wird, bezogen auf die gesamte Industrie, im internationalen Vergleich die Diffusion von CNC-Maschinen als unterdurchschnittlich eingestuft (VDI-Nachrichten 41/1992, S. 6); vorliegenden Zahlen zufolge machte der CNC-Anteil am Gesamtbestand von Werkzeugmaschinen in den USA 1991 reichlich 5 % gegenüber knapp 12 % in der Bundesrepublik aus. Erst in jüngerer Zeit wird von einem schnell wachsenden Interesse der gesamten amerikanischen Industrie an flexibler Automatisierung berichtet.

So wurde die Werkzeugmaschinenmesse 1988 in Chicago als "CNC-Messe" bezeichnet, da dort erstmalig auf breiter Front CNC-Maschinen ausgestellt wurden, auf die sich das Hauptinteresse der Besucher richtete. Einschlägigen Messeberichten zufolge fanden vergleichbare Messen in der Bundesrepublik mehr als zehn Jahre früher statt (VDI-Nachrichten 39/1988, S. 26 f.). Auf früheren US-Messen dieser Art dominierten demgegenüber komplexe und hoch automatisierte Anlagen wie flexible Fertigungssysteme (vgl. Mertins 1981), während auf breite Anwendbarkeit ausgerichtete Technik eine nur nachgeordnete Rolle spielte.

Ein Grund für die geringe Innovationsneigung lag fraglos in den Bedingungen des bis dahin vergleichsweise stabilen und großen Inlandsmarktes und den darauf gerichteten und eingefahrenen Absatzstrategien. Als besonderer Beharrungsfaktor erweisen sich darüber hinaus aber die festgefügtten betriebsinternen Strukturen von Arbeitsteilung und Hierarchie. Wie eine neuere Untersuchung über die technisch-organisatorische Innovationsfähigkeit amerikanischer Metallbetriebe ausweist, sperren sich dabei bis heute insbesondere die diese Strukturen massiv stützenden, kollektivvertraglich sanktionierten "work rules" gegen Veränderungen (Harvey 1992).

Aufgrund der Dominanz der Großbetriebe der Massenproduktion waren die Produkt- und Innovationsstrategien des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus auf die Produktion und inkrementelle Weiterentwicklung konventioneller Automatisierungstechniken beschränkt; Innovationen jedoch, die dem wachsenden Interesse der "job shops" an flexibler Automatisierung hätten entgegenkommen können, konnten seit Ende der 70er Jahre in der erforderlichen Reichweite und Schnelligkeit kaum eingeleitet werden. Denn die Mehrheit der Werkzeugmaschinenbaubetriebe war vor allem auch aufgrund der mangelnden betriebsinternen Ressourcen an Personal, Qualifikation und Know-how für Innovationen nur unzureichend gerüstet. Die langjährige Vernachlässigung bestehender Qualifikationsressourcen im Zusammenspiel mit einer fortschreitenden Spezialisierung von Personaleinsatz- und Tätigkeitsstrukturen hatte das Innovationspotential sehr erheblich eingeschränkt. Als besonders gravierender Engpaß erwiesen sich die Konstruktionsbereiche. Entweder fehlte technisches Personal, das in der Lage gewesen wäre, die neuen computertechnologischen Möglichkeiten mit den gewandelten praktischen Erfordernissen in neue Maschinenkonzepte umzusetzen, oder aber das Personal konnte aufgrund kurzfristiger Personalpolitiken nicht auf Dauer in den Betrieben gehalten werden. Daneben ist aber auch der Mangel an beruflich ausgebildeten Produktionsarbeitern als wichtige Innovationsbarriere anzusehen. Aufgrund der vorherrschenden Spezialisierung und nur betriebsspezifischen Qualifikationsstruktur wären die Werkstattbelegschaften in der Regel kaum in Lage gewesen, Neukonstruktionen von Werkzeugmaschinen ohne größere Probleme schnell und zuverlässig zu fertigen und die damit verbundenen Prozeßinnovationen zu bewältigen. Aus diesem Grund bezeichnete ein in einem amerikanischen Werkzeugmaschinenbetrieb interviewter "Plant Manager" es als Fehler, daß der Betrieb in den 60er Jahren sein betriebliches Lehrlingssystem aus Kostengründen abgeschafft habe. Versuche seiner Wiedereinführung seien jedoch bislang am Widerstand des oberen Managements gescheitert, das nach wie vor die Kosten eines solchen Systems scheue.

Dieses Kostenargument verweist freilich auf mehrere, miteinander verschränkte Problemlagen der Personalpolitik amerikanischer Betriebe, die einer Wiedereinführung von Lehrlingssystemen und damit einer Verbesserung des Qualifikationspotentials entgegenstehen: Zum einen kollidiert die Einführung von Lehrlingssystemen mit der bislang vorherrschenden personalpolitischen und generellen Kurzfristorientierung amerikanischer

Betriebe. Denn die damit verbundene Investition in "Humankapital" würde die Betriebe zu einer längerfristig ausgerichteten Politik der Personalstabilisierung drängen, um eine Amortisation dieser Investitionen sicherzustellen. Zum zweiten wäre nicht sichergestellt, daß die qualifizierten Arbeitskräfte ihrerseits länger im Betrieb verweilen würden. Denn sie verfügen im Unterschied zu den sonst vorherrschenden betriebspezifisch qualifizierten Arbeitskräften angesichts der generell zunehmenden Knappheit von "skilled workers" in der amerikanischen Industrie über Qualifikationen hoher Arbeitsmarktgängigkeit. Die Furcht des Managements ist daher begründet, daß diese qualifizierten Arbeitskräfte schnell in andere Betriebe abwandern würden. Drittens muß von wachsenden Schwierigkeiten der Betriebe ausgegangen werden, an einer längeren Ausbildung interessierte und dafür hinreichend motivierte Arbeitskräfte finden zu können. Auch aus der Sicht der Arbeitskräfte lohnt sich nämlich vielfach eine mehrjährige Lehrlingsausbildung nicht, da es aufgrund der vorherrschenden kurzfristigen Personalpolitik der Betriebe keinesfalls gesichert ist, daß die Verdiensteinbußen, die eine Lehre mit sich bringt, später durch eine kontinuierliche Beschäftigung kompensiert werden. Schließlich benötigte eine berufliche Ausbildung einen erheblichen Aufwand an Kosten und Zeit, da durch das absinkende Niveau der allgemeinbildenden Schulen nicht die für den Eintritt in ein betriebliches Lehrlingsystem erforderlichen Mindestqualifikationen bereitgestellt wurden (Bluestone et al. 1981, S. 133 f.; Kazis et al. 1989, S. 15 ff.).⁶

Diese betrieblichen Defizite konnten auch durch den Rückgriff auf betriebsexterne Potentiale, insbesondere durch Kooperation mit ingenieurwissenschaftlichen Institutionen, nicht kompensiert werden. Neben den fehlenden "intermediären Organisationen" wie etwa Verbänden ist diese Situation Folge der skizzierten Ausrichtung des FuE-Systems auf militärische Großforschung. Institutionelle, personelle und finanzielle Ressourcen fertigungstechnischer Innovationen standen den vornehmlich zivil orientierten Innovationen kaum noch zur Verfügung. Die Entwicklung spezialisierter und komplexer Systeme absorbierte einen Großteil der bei den großen Werkzeugmaschinenherstellern und Steuerungsherstellern vor-

6 In den 80er Jahren spielten im Rahmen der beruflichen Bildung staatliche Maßnahmen eine sehr nachgeordnete Rolle. Einige staatlich finanzierte Programme richteten sich bislang darauf, durch zusätzliche Ausbildungsgänge die Arbeitsmarktchancen nur unzureichend gebildeter Bevölkerungsschichten zu verbessern (Kazis et al. 1989, S. 12).

handenen Entwicklungskapazitäten, und diese Großhersteller entwickelten sich faktisch zu einem separaten Teil der Produktionsmittelindustrie.

Eingebettet in diese strukturellen Zusammenhänge hatten schließlich die Entwicklungskonzepte des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters eine nachhaltige Leitbildfunktion für die gesamte fertigungstechnische Entwicklung. Einfache und flexibel anpaßbare Techniken wurden nicht als lohnenswertes Entwicklungsziel angesehen, sondern komplexe "High-End"-Systeme und ein möglichst weitreichender Computereinsatz: "the early emphasis on big NC machines by large companies created a mindset within the industry that discouraged others from applying the technology to small, simple machines", so Reintjes (1991, S. 177), der frühere Direktor des Servo Lab am MIT.

Daher erweist sich das zivile Innovationsmuster als "Auslaufmodell". Seine Bedingungen und Strukturen erlaubten fertigungstechnische Innovationen offensichtlich nur in sehr begrenztem Umfang und begrenzter Reichweite, die den gewandelten Anforderungen kaum gerecht werden.

c) Stabilität des wissenschaftlich-militärischen Arrangements

Damit stellt sich die Frage, warum die wissenschaftlich-militärisch entwickelten Fertigungstechniken nicht für die sich ändernden zivilen Anforderungen nutzbar gemacht worden sind und ob die zivilen Innovationen erforderlich gewesen wären. Die NC-Entwicklung zeigt jedoch, daß dies weder technisch noch institutionell im erforderlichen Umfang möglich gewesen ist. Die verfügbaren Techniken waren aufgrund ihres hohen Automatisierungsgrads, ihrer Komplexität und organisatorischen Inflexibilität sowie aufgrund der damit verbundenen Kosten ihrer Anwendung speziell für Anwendungsbereiche aus der Rüstungsindustrie ausgelegt. Sie konnten daher für die meisten zivilen Anwendungsfelder nicht direkt übernommen werden. Erforderlich wurde, wie der "down-market"-Prozeß der amerikanischen NC-Technik in den 60er Jahren zeigte, ein zusätzlicher Entwicklungsprozeß, der technisch schwierig und zeit- und kostenintensiv war. Dabei kamen Innovationen, die eine grundlegende Abkehr von diesem technischen Entwicklungspfad bedeutet hätten, kaum zustande.

Die Gründe für die mangelnde Flexibilität des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters liegen vor allem in der überaus hohen Stabilität der militärischen Anwenderindustrien, für die die komplexen Techniken entwickelt wurden. Diese Industrien waren kaum einem Anpassungs- und Veränderungsdruck ausgesetzt. Sie waren entweder, wie im Fall der Rüstungsindustrie, politisch von der Entwicklung der Absatzmärkte entkoppelt⁷ oder sie wiesen, wie im Fall der zivilen Luftfahrtindustrie, eine teilweise monopolähnliche Stellung auf dem Weltmarkt auf und waren von den üblichen Weltmarkterfordernissen abgelöst (Dertouzos et al. 1989, S. 11 ff.).

Daher blieben die einflußreichen Entwickler dieses Innovationsmusters seit den 50er Jahren auf einen Entwicklungspfad von Fertigungstechnik ausgerichtet, der von einer dominanten Wissenschaftsorientierung gepaart mit einem hoch spezialisierten Anwendungsbezug gekennzeichnet ist. Das maßgebliche Entwicklungspersonal bei den großen Werkzeugmaschinenherstellern, bei den Steuerungsherstellern wie insbesondere den beteiligten Instituten war zwar führend in der Umsetzung von Informatikwissen und Computertechnologien in elaborierte Fertigungstechniken, hatte jedoch weder Erfahrung bei der selektiven Nutzung dieses Wissens für die Entwicklung flexibel nutzbarer Techniken, noch war es mit entsprechenden Anforderungen konfrontiert. Vielmehr waren die Interessen und Vorstellungen der Ingenieure und Wissenschaftler an Frontforschung und der Realisierung technischer Spitzenleistungen nahezu deckungsgleich mit den von ökonomischen Restriktionen wenig beeinflussten Interessen der maßgeblichen Auftraggeber an komplexen und hochautomatisierten Fertigungstechniken.

Dies verweist auf eine weitere wichtige Ursache für die mangelnde Flexibilität des wissenschaftlich-militärischen Musters, nämlich auf die überaus hohe Stabilität und Geschlossenheit der Arrangements der an der Technikentwicklung beteiligten kollektiven Akteure; dominant ist bis heute eine relativ stabile Achse von staatlichen bzw. militärischen Institutionen, wissenschaftlichen Einrichtungen, einigen Großherstellern des Werkzeugmaschinenbaus, der Elektrotechnischen Industrie und Computerindustrie sowie den einflußreichen Anwendern aus den "High-Tech"-Industrien.

7 Dies gilt insbesondere für die erste Hälfte der 80er Jahre infolge der Rüstungsprogramme der Reagan-Administration.

Damit einher geht die Bündelung von Ressourcen und Know-how auf ausgewählte Technikkonzepte sowie ein nur begrenztes Spektrum alternativer und verfügbarer Entwicklungsoptionen, auf die für die erforderlichen Innovationen zurückgegriffen werden konnte.

Der hier verfolgte technische Entwicklungspfad hoher Komplexität und weitreichender Automatisierung wurde gestützt von ständig neu aufgelegten militärischen Förderprogrammen (Wobbe 1988), die das Spektrum der zu entwickelnden Techniken in Richtung einer immer umfassenderen Nutzung der Computertechnologien ausweiteten. Wie angeführt, ging es dabei immer weniger um Maschinen- und Anlagentechniken allein als vielmehr um ihre Verknüpfung mit computergestützt ausgeführten Vorbereitungs- und Planungsfunktionen bis hin zu betriebsumfassenden Konzepten des Computer Integrated Manufacturing. Ähnlich wie die mangelnden Ressourcen der zivilen Entwickler verhindern daher die festgefügt Strukturen des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters, daß in den USA bis heute in größerem Umfang einfachere und für eine breite Anwendbarkeit ausgelegte Fertigungstechniken entwickelt werden (Collis 1988, S. 108 f.; March et al. 1989, S. 26 f.).

Damit zeigt sich auch im Fall von fertigungstechnischer Entwicklung, daß militärische Innovationen nur sehr begrenzt für eine zivile Nutzung taugen bzw. nur mit mehr oder weniger großem Zusatzaufwand für zivile Zwecke nutzbar gemacht werden können. Folgt man der einschlägigen Literatur (z.B. Rödel 1972, S. 151 ff.), so war eine positive Korrelation zwischen Innovationen im Rüstungssektor und damit induzierten zivilen "spin offs" allenfalls bis zum Anfang der 50er Jahre signifikant, für die Zeit danach kaum noch. Offenkundig zeichnet sich die überwiegende Mehrheit insbesondere militärischer High-Tech-Innovationen durch einen sehr spezialisierten Charakter aus, so daß die Umsetzung in zivil nutzbare Techniken immer schwerer und bestenfalls auf zeit- und kostenaufwendigen Umwegen möglich wird. Es ist, wie der Fall des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus eindringlich zeigt, wohl weithin davon auszugehen, daß Investitionen in militärische Spitzenleistungen zum Verlust ziviler Märkte führen (Branscomb 1992). Damit ist zugleich eine der zentralen Prämissen der staatlichen FuE-Politik der USA hinfällig, die über Jahrzehnte hinweg ihre militärische Ausrichtung mit den sich zugleich eröffnenden zivilen Nutzungsmöglichkeiten der geförderten Innovationen begründete (Jenne 1985).

5. Zukünftige Probleme

Fraglos erwiesen sich im letzten Jahrzehnt die bundesrepublikanischen Konzepte von Fertigungstechnik den sich wandelnden Anwendungsbedingungen als angemessener und damit ökonomisch als erfolgreicher. Sieht man einmal von der wachsenden Bedeutung Japans auf dem Markt für Fertigungstechniken ab,⁸ so sind der in den 80er Jahren weithin anhaltende Erfolg des westdeutschen und die Krise des amerikanischen Werkzeugmaschinenbaus beredtes Beispiel für diese Situation. Fragt man freilich nach zukünftigen Entwicklungstendenzen und Entwicklungserfordernissen von Fertigungstechnik, so sind einmal die sich weiterhin schnell verändernden industriellen Anwendungsanforderungen an Fertigungstechnik und zum zweiten die in den letzten Jahren ebenso schnell wachsenden Potentiale der Informatik und Computertechnologie, die für fertigungstechnische Entwicklung genutzt werden können, in Rechnung zu stellen.

a) Neue Anforderungen an fertigungstechnische Entwicklung

Erkennbar ist ein sich verstärkender Entwicklungstrend in Richtung integrierter und betriebsumfassender Produktionssysteme. Ausgehend von den CNC-Steuerungstechniken zur flexiblen Automatisierung von Werkzeugmaschinen und Fertigungssystemen, werden Computertechnologien zunehmend als Organisationstechniken zur Simulation, Abstimmung und Synchronisation von Teilprozessen der Produktion und der Verknüpfung unmittelbar bearbeitender Prozeßfunktionen mit organisatorischen Funktionen der Planung, Steuerung und Kontrolle genutzt (Kap. II, 4.). Konkret bedeutet dies die Weiterentwicklung der schon in den 70er Jahren entworfenen Konzepte des Computer Integrated Manufacturing (Kap. VI, 1.) hin zu ihrer praktischen Nutzbarkeit; im einzelnen geht es dabei um rechnerintegrierte Organisations- und Planungstechniken wie PPS (Produktionsplanung und -steuerung), CAD/CAM (Computer Aided Design, Computer Aided Manufacturing), DNC (Direct Numerical Control) oder CAQ (Computer Aided Quality).

8 Einen Hinweis auf die dominante Position Japans auf dem Weltmarkt für Werkzeugmaschinen geben die Zahlen in Tabelle 14.

Dieser sich verstärkende Entwicklungstrend von Fertigungstechnik steht in Zusammenhang mit neuen Anwendererfordernissen, die in der Industriesoziologie als "systemische" Rationalisierungsstrategien begriffen werden (Altmann u.a. 1986). Unter dem Druck des fortschreitenden Umbruchs auf den Absatzmärkten richten sie sich auf die Ausschöpfung bislang brachliegender Rationalisierungspotentiale - vor allem durch die Optimierung der betriebsübergreifenden Koordination betrieblicher Teilprozesse und die Systematisierung der gesamtbetrieblichen Abläufe. Auf diesem Wege soll eine kostenminimale und zugleich möglichst flexible Produktion realisiert werden. Rationalisierung zentriert sich damit nicht mehr nur auf die Leistungsfähigkeit einzelner Bearbeitungsprozesse und die Nutzung einzelner Maschinen und Anlagen, sondern auf die Effizienz gesamtbetrieblicher Abläufe, wobei zunehmend auch die zwischenbetriebliche Arbeitsteilung einbezogen wird. Insofern finden sich diese neuen Rationalisierungsstrategien nicht nur, wie zu vermuten wäre, hauptsächlich in Großbetrieben, sondern zunehmend sind davon auch mittlere und kleinere Betriebe, etwa als Zulieferer für Großbetriebe, betroffen (Altmann, Sauer 1989).

Zentrales Instrument systemischer Rationalisierungsstrategien sind CIM-Systeme. Sie ermöglichen eine betriebsweite und überbetriebliche Zusammenhänge umfassende Informationsverarbeitung zentraler Prozeßparameter und erlauben ihre ständige und umfassende Abstimmung und Optimierung. Richtig eingesetzt, verbinden sich mit CIM-Systemen beträchtliche Potentiale an Kosteneinsparung und Verringerung von Produktionszeiten (Hirsch-Kreinsen u.a. 1990). Daher ist in den letzten Jahren eine deutlich zunehmende Verbreitung rechnerintegrierter Systeme zu beobachten. Neueren Befunden zufolge steht die westdeutsche Metallindustrie "an der Schwelle" zur umfassenden Rechnerintegration betriebsinterner und betriebsexterner Produktionszusammenhänge (Schultz-Wild u.a. 1989). Ähnliche, allerdings noch nicht so ausgeprägte, Trends zeigen sich in der amerikanischen Metallindustrie (Kelley, Brooks 1988). Die wachsende Bedeutung rechnerintegrierter Organisations- und Planungstechniken für den Prozeß industrieller Rationalisierung zeigt sich darüber hinaus daran, daß der weltweite Markt für NC-Steuerungen in den letzten Jahren zu stagnieren beginnt, während der Markt für integrierte Rechnersysteme der verschiedensten Art hohe Zuwachsraten aufweist (z.B. Mulkens 1987).

Technologische Voraussetzung dieser Entwicklung sind die Potentiale der Informatik und Computertechnologie; hochintegrierte Speicher und Mikroprozessoren, damit ermöglichte aufwendigere und komplexere Programme, aber auch vereinfachte und effizientere Programmierverfahren; die Grenzen der Computeranwendung werden immer weiter hinausgeschoben. Dies betrifft, wie gezeigt, auch die fertigungstechnische Entwicklung, deren fortschreitende Durchdringung mit Informatik und Computertechnologien von Experten verschiedentlich als "technologischer Quantensprung" des Werkzeugmaschinenbaus bezeichnet wird (Clever 1992). Auf diese Weise verändert sich der Charakter von Fertigungstechnik nachhaltig. Sie kann nicht mehr länger nur als allein spanende oder stoffformende Technik verstanden werden, sondern sie umfaßt zunehmend die Funktionen der Koordination, Planung und Kontrolle von Produktionsprozessen. Unter Fertigungstechnik können daher nicht mehr allein Werkzeugmaschinen und die unmittelbar mit ihnen verbundenen Einrichtungen der Steuerung und Beschickung verstanden werden. Vielmehr wird, wie gezeigt, der gesamte Komplex der betrieblichen Organisations- und Vorbereitungsfunktionen Gegenstand von Entwicklungsanstrengungen. Fertigungstechnik wird zu Organisationstechnik und umfaßt zunehmend Software der verschiedensten Art, spezifisch ausgelegte Schnittstellen zwischen verschiedenen Hard- und Software-Systemen und Kommunikationsnetzwerken (Kap. II, 4). Damit erreicht die fertigungstechnische Entwicklung ein neues Niveau von Verwissenschaftlichung,⁹ das die Entwickler mit neuen Anforderungen und Problemen konfrontiert:

Die Modellbildung und Simulation der Prozesse beschränken sich nicht mehr nur auf die unmittelbaren Bearbeitungsprozesse und die darauf wirkenden Parameter, sondern sie richten sich auf die Abbildung umfassender technisch-organisatorischer Prozeßzusammenhänge. Die Modellbildung wird immer komplexer und aufwendiger und berücksichtigt werden müssen zahlreichere, sehr verschiedene Einflußgrößen. Konkret spiegelt sich dies in der Entwicklung von Datenbanken und Unternehmensdatenmodellen wider, die die Funktionsvoraussetzung fortgeschrittener CIM-Konzeptionen darstellen; so war der Entwurf eines abstrakten funktions-

9 Im Sinne der oben erwähnten institutionell orientierten ökonomischen Innovationsforschung (Kap. II, 4.) kann dies als das Aufkommen eines neuen "technologischen Paradigmas" begriffen werden, von dem ebenso neue "technological trajectories" ausgehen.

und datenflußorientierten "Model of Manufacturing", das einen einheitlichen Bezugsrahmen für die Systementwicklung und -implementierung schaffen sollte, eines der zentralen Probleme bei der ersten Auslegung eines CIM-Systems (Harrington 1984, S. 189 ff.).

Dadurch kommen neuartige Entwicklungsprobleme hinzu: Zum einen müssen über die Entwicklung von Kommunikationstechniken und Computernetzwerken die Voraussetzungen für einen jederzeit möglichen Informationsfluß in einem rechnerintegrierten System geschaffen werden; dies betrifft die Aufnahme von Informationen über den realen Prozeß, ihre ungehinderte und verlässliche Weiterleitung und die verschiedensten personellen Zugriffsmöglichkeiten auf die Informationsbestände. Damit zusammen hängt zum anderen als zentrales Problem die Auslegung von Schnittstellen zwischen einzelnen Computersystemen verschiedenster Art und Funktion, über die erst ein reibungsloser und funktionsgerechter Informationsfluß zustande kommt. Dieses Problem ist bis heute Gegenstand erheblicher Entwicklungsanstrengungen und wird von Experten als keineswegs gelöst angesehen (z.B. Voelzkow 1989).

Diese Verschiebung der Entwicklungsprobleme und Anforderungen hat zur Konsequenz, daß bisherige Arrangements zwischen Entwicklern und Anwendern wie die zwischen Entwicklern sich verschieben. Auf der einen Seite erfordert die wachsende Komplexität und der betriebsübergreifende Charakter von integrierten Fertigungssystemen intensivere Beziehungen zwischen Entwicklern und Anwendern; notwendig wird die Anpassung und Modifikation der CIM-Systeme an die je spezifischen organisatorischen Gegebenheiten der Anwender. Der Prozeß der Technikentwicklung läßt sich damit immer weniger von dem der späteren Technikanwendung trennen (vgl. Asdonk u.a. 1991; Deiß, Hirsch-Kreinsen 1992).

Auf der anderen Seite werden disziplinäre und institutionelle Grenzen der beteiligten Entwickler überschritten, und die Distanz maßgeblicher Entwickler zu den Erfordernissen praktischer Technikanwendung nimmt zu. Die Entwicklung solcher Systeme und die Bewältigung der damit verbundenen Probleme lassen sich immer weniger auf der Basis maschinenbautechnischen Ingenieurwissens, das partiell durch Informatik- und Computerwissen ergänzt wird, bewerkstelligen. Vielmehr scheint eine grundlegende Schwerpunktverschiebung fertigungstechnischen Ingenieurwissens hin zur Informatik und damit verbundener Grundlagenwissenschaften wie

Mathematik unvermeidbar zu sein. Personell-qualifikatorisch bedeutet dies den wachsenden Einfluß von wissenschaftsorientierten technischem Personals, institutionell geht es um eine zunehmende Bedeutung grundlagenorientierter Wissenschaftseinrichtungen und Organisationen.

b) Probleme des deutschen Innovationsmusters?

Damit unterliegt fertigungstechnische Entwicklung einem Wandlungsprozeß, der mit den institutionellen Grundstrukturen und Entwicklungsstrategien des bundesdeutschen Innovationsmusters zu kollidieren droht. Es liegt die Frage nahe, ob im Rahmen dieses Musters die in Zukunft erforderlichen Innovationen von Fertigungstechnik wie bisher in der erforderlichen Reichweite und Schnelligkeit bewältigt werden können.¹⁰ Ohne daß an dieser Stelle eine erschöpfende Antwort gegeben werden kann, kann auf abschbare Problemfelder verwiesen werden:

(1) Offen ist, ob auch weiterhin wie bisher die fortschreitende "Informatisierung" von Fertigungstechnik von den nach wie vor dominanten Entwicklern - Werkzeugmaschinenbau und ingenieurwissenschaftlichen Instituten des Maschinenbaus - friktionslos bewältigt werden kann. Fraglos ist dieser Prozeß durch die Integration entsprechender Institutionen in den Entwicklerverbund relativ reibungslos und effektiv - wie etwa durch den schon erwähnten Aufkauf von Software-Firmen durch Werkzeugmaschinenhersteller - gelungen. Doch ist es zumindest fraglich, ob der unterstellte fertigungstechnische Paradigmenwechsel auf Dauer hauptsächlich nur durch die Integration von Informatik und Computertechnologie in das vorhandene Arrangement bewältigt werden kann. Erforderlich scheint vielmehr sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf anwendungsorientierter Ebene eine deutliche Ausweitung des Entwicklerzusammenhangs in Richtung informatikorientierter Institutionen und Grundlagenwissenschaften. Das Problem ist jedoch, daß bislang aus der Sicht der bisherigen Entwicklerkonstellation in dieser Richtung noch teilweise tiefe disziplinä-

10 Hintergrund dieser Frage ist die neuere ökonomische und industriepolitische Diskussion über die in Zusammenhang mit neuen Technologien häufig als mangelhaft angesehene Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie. Dabei werden auch dem Maschinenbau wie insbesondere dem Werkzeugmaschinenbau zunehmende Anpassungs- und Innovationsschwierigkeiten prognostiziert (z.B. Häusler 1990; Seitz 1990, S. 109 ff.)

re und institutionelle Gräben existieren. Zudem ist in der Bundesrepublik im Unterschied zu den USA die Computer- und insbesondere Software-Industrie geringer entwickelt, so daß ihre Beteiligungsmöglichkeiten an der Entwicklung rechnerintegrierter Fertigungstechniken begrenzt sind. Diese Situation wird nicht selten als generelles Problem der zukünftigen Innovationsfähigkeit der deutschen Industrie angesehen.

(2) Zum zweiten kann es bei den Entwicklungsprozessen immer weniger - wie im Fall der NC- und CNC-Technik - um die Integration von Computertechnologien in im Prinzip vorhandene und bewährte Maschinen- und Anlagentechniken gehen als vielmehr umgekehrt um die systematische Entwicklung prinzipiell neuer Organisations- und Planungstechniken und die daran orientierte Anpassung und Modifikation der bisherigen Maschinen- und Anlagentechniken; zunehmend wichtigerer Bezugspunkt der Technikentwicklung wird damit die Organisation des Produktionsprozesses in seiner Gesamtheit und die Integration verschiedener, früher voneinander separierter Teilprozesse gegenüber der bisherigen Konzentrierung auf einzelne Verfahren und Teilprozesse. Offen erscheint dabei, ob diese Anforderungen mit den bisherigen praxisorientierten Methoden und Routinen der Entwicklung und des Entwurfs, insbesondere des nur gezielten und partiellen Rückgriffs auf neue Technologien, im Rahmen der nach wie vor maschinenbauorientierten FuE-Strukturen zu bewältigen sind.

(3) Offen erscheint zum dritten, ob die in den Entwicklungsprozessen vorherrschende Struktur des technischen Personals, die hohe Bedeutung von Werkstattbezug und Erfahrungswissen und die diese Bezüge stützenden Karrieremuster und die existierenden Ingenieurs-Communities den jetzt erforderlichen Entwicklungssprung bewältigen können. Fraglos steht der in den letzten Jahren im Maschinenbau abnehmende Anteil von Maschinenbauingenieuren in Zusammenhang mit den gewandelten Anforderungen, doch werden diese, wie gezeigt (Kap. VII, 3.), hauptsächlich von Elektroingenieuren und weniger von Informatikern ersetzt, so daß die Gefahr wachsender Kompetenz- und Know-how-Defizite nicht von der Hand zu weisen ist. Offen erscheint in diesem Zusammenhang auch, welches Beharrungsvermögen die bisherigen, vornehmlich auf Werkzeugmaschinenentwicklung ausgerichteten Ingenieur-Communities mit ihren Leitbildern und Entwicklungszielen entfalten und damit die erforderliche Umorientierung der fertigungstechnischen Entwicklung hemmen. Zur Bewältigung der zunehmenden Breite technologischer Potentiale und techni-

scher Gestaltungsalternativen scheint die Schaffung von neuen Leitbildern und Orientierungswissen zunehmend unverzichtbar zu werden.

(4) Problematisch erscheint schließlich, wie dabei der erforderliche Praxisbezug gewahrt bleiben kann. Denn die skizzierten Tendenzen der fortschreitenden Verwissenschaftlichung beinhalten die Gefahr einer zunehmenden Distanz wichtiger Entwickler von Praxisanforderungen mit der Folge von kosten- und zeiträchtigen Fehl- und Umwegentwicklungen. Um dies zu vermeiden, ist ein hoher Abstimmungs- und Koordinationsaufwand in einem ohnehin erweiterten Arrangement von Akteuren erforderlich; die Zahl von Rückkopplungsschleifen zwischen unterschiedlich spezialisierten Entwicklern steigt, und die Notwendigkeit einer intensivierten Kooperation zwischen den verschiedenen Akteuren wird notwendig. Nicht zuletzt wächst damit die Bedeutung "intermediärer", zwischen den verschiedenen Akteuren vermittelnder Institutionen wie die von Verbänden oder auch der staatlichen Technologiepolitik beträchtlich, doch ist zu fragen, ob diese neuen Anforderungen die bisherigen Kapazitäten dieser Institutionen nicht übersteigen.

Trotz seiner bisher erwiesenen Flexibilität in Hinblick auf die Weiterentwicklung existierender Systemlösungen und die Integration neuer technologischer Möglichkeiten zeichnen sich damit strukturelle Grenzen des deutschen Innovationsmusters ab. Sie können in Zukunft zum Problem werden und es schwerer machen, die technologischen Entwicklungen und sich wandelnde Anwendererfordernisse in neue technische Konzepte umzusetzen. Es erscheint als schwierig, einerseits die immer breiteren technologischen Potentiale zu erfassen und andererseits praxisorientiert und gezielt nutzen zu können. Nicht auszuschließen sind damit Zeitverzögerungen bei der Bereitstellung neuer Konzepte, die angesichts der auf dem Weltmarkt konkurrenzbedingten ständigen Verkürzung von Produktlebenszyklen auch bei Fertigungstechniken längerfristig Rückwirkungen auf die bisherige Struktur des deutschen Werkzeugmaschinenbaus haben können.

Ein Indiz für diese Situation ist, daß der Markt für neue Systeme des Computer Integrated Manufacturing zunächst hauptsächlich von ausländischen, insbesondere von amerikanischen Konzepten und Systemen geprägt wurde. Dies betrifft beispielsweise, aber nicht nur, den Markt für rechnerunterstützte und -integrierte Konstruktions- und Planungssysteme

(CAD/CAM), der 1989 zu mehr als 60 % von amerikanischen Herstellern dominiert wurde (Handelsblatt, 31.5.1990). Offenbar hängen die Zukunftschancen des bisherigen deutschen Innovationsmusters erheblich von seiner Fähigkeit ab, nicht nur im Prinzip bekannte Techniken an sich wandelnde Bedingungen anzupassen und dabei - wie im Fall der breiten Entwicklung von werkstattprogrammierbaren CNC-Steuerungen ab Mitte der 70er Jahre - auf bislang kaum genutzte Entwicklungspotentiale aus der Vergangenheit zurückzugreifen, sondern auch neue Entwicklungspfade verfolgen zu können.

c) Chancen für amerikanische Entwickler?

Anders als der amerikanische Werkzeugmaschinenbau erweisen sich die FuE-Bedingungen des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters in Hinblick auf die Entwicklung rechnerintegrierter Systeme als leistungsfähig. Dies zeigen die frühen Versuche mit DNC-Systemen und CAD/CAM-Systemen spätestens ab Ende der 60er Jahre sowie die frühen Konzepte des Computer Integrated Manufacturing, die bis zum Anfang der 70er Jahre zurückreichen (Harrington 1973). Allen vorliegenden Informationen zufolge beschränkt sich der Einsatz dieser Systeme dabei nicht nur auf die Luft- und Raumfahrtindustrie, sondern sie finden, wie etwa CAD/CAM-Systeme, auch bei vielen zivilen sowohl amerikanischen als auch westeuropäischen Anwendern Verwendung.¹¹

Es kann daher gefragt werden, ob einige der grundlegenden Momente des bisherigen wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters eine wichtige Voraussetzung für die innovative Entwicklung rechnerintegrierter Systeme und die Bewältigung der Anforderungen der damit verbundenen stärkeren Verwissenschaftlichung sind und sich die fertigungstechnische Entwicklung der USA bei solchen Systemen auch in Zukunft als innovativ und bestimmend erweisen wird?

11 Soweit einschätzbar, spielen japanische Entwickler von fertigungsbezogenen Software-Systemen, sieht man einmal vom CNC-Markt ab, international eine nur nachgeordnete Rolle. Als Hinweis mag an dieser Stelle genügen, daß sich unter den 25 umsatzstärksten Anbietern von Standard-Software in Europa 1989 zwar zwölf amerikanische Unternehmen und vier bundesdeutsche, jedoch kein japanisches Unternehmen befinden (Schneider, Welsch 1992).

Ohne diese Frage ausführlicher diskutieren zu können, liegt es zunächst nahe, auf die schon bisher hohe Informatikorientierung der Akteure des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters zu verweisen, der in Zukunft eine ständig wachsende Bedeutung zukommen wird. Wichtig hierfür sind ihre seit jeher auf umfassende Nutzung der Computertechnologie gerichteten Entwicklungsstrategien, die aufgrund der engen Beziehungen zwischen industriellen Entwicklern und Informatikinstituten vorhandenen Innovationsressourcen und schließlich die hohe Verfügbarkeit theoretisch ausgebildeten Entwicklungspersonals.

In diesem Zusammenhang spielt vor allem auch die Computer- und Software-Industrie für die fertigungstechnische Entwicklung eine immer wichtigere Rolle. Dieser Industriesektor weist in den USA ein hohes Gewicht auf und entwickelt sich, ganz im Gegensatz zur generell schwierigen ökonomischen Situation der USA, bis heute überaus dynamisch; vor allem im Software-Bereich sind amerikanische Unternehmen weltweit führend (Dertouzos et al. 1989, S. 260 ff.). Zwar waren Computerhersteller schon in den 60er Jahren, etwa bei der CAD-Entwicklung, mit fertigungstechnischer Entwicklung eng verbunden, doch nimmt zweifellos ihre Bedeutung mit der Entwicklung von Konzepten der rechnerintegrierten Produktion beträchtlich zu, da zumeist sie über das erforderliche generelle computertechnologische Know-how, über Hardware-Auslegung, Programmierung, Schnittstellengestaltung etc. verfügen (Seitz 1990, S. 108 ff.).

Dabei weist dieser Industriesektor eine vorherrschende Orientierung an zivilen Absatzfeldern auf, die auch für die weitere Verbreitung der fertigungstechnischen Systeme von Relevanz sein dürfte. Zwar basierte auch das Aufkommen der Computer- und Software-Industrie in den USA auf militärischer Förderung und Beeinflussung, doch waren wesentliche Vorarbeiten der heutigen Computerentwicklung ziviler Natur und wurden von Großunternehmen der Rechenautomation, typisch IBM, geprägt (z.B. Brödner u.a. 1981).

Endlich sind die in diesem Zusammenhang in den USA überaus günstigen gesellschaftsstrukturellen Voraussetzungen zu sehen, die schon in den letzten Jahren das Aufkommen innovativer Computer- und Software-Konzepte begünstigten: die skizzierten wissenschaftlichen Reproduktionsmuster des technischen Personals sowie insbesondere die Ausrichtung des Wissenschaftssystems auf Grundlagenforschung und Informatik, die auch

für die Weiterentwicklung rechnerbasierter Fertigungstechniken eine wichtige Voraussetzung bilden. Insofern kann vermutet werden, daß diese Entwicklung auch in Zukunft von Unternehmen aus den USA maßgeblich mit vorangetrieben werden wird. Offen bleibt jedoch die Frage, in welcher Weise sich die erforderlichen Abstimmungsprozesse mit Praxiserfordernissen einspielen, die sich schon bei der NC-Entwicklung als ein gravierendes Problem vieler amerikanischer Hersteller erwiesen haben.

d) Auflösung nationalspezifischer Grenzen

Mit der fortschreitenden Verwissenschaftlichung fertigungstechnischer Entwicklung verbinden sich schließlich Tendenzen, die auf eine Auflösung der bisherigen nationalspezifischen Grenzen fertigungstechnischer Innovationsmuster hinauslaufen. Unverkennbar ist der zunehmend grenzüberschreitende Charakter fertigungstechnischer Entwicklung, insofern als die Software-Entwickler häufig, allein oder in sog. "strategischen Allianzen" weltweit agierende Hersteller sind, deren Innovations- und Absatzstrategien vor allem am Kriterium möglichst breiter Einsetzbarkeit der von ihnen entwickelten Systeme in den verschiedensten Branchen und unter sehr divergierenden betrieblichen Bedingungen und nicht an einem speziellen Anwendungsbezug ausgerichtet sind. Gestützt wird diese Tendenz zur Internationalisierung fertigungstechnischer Entwicklung von der fortschreitenden Globalisierung der industriellen Arbeitsteilung und von damit einhergehenden Anwenderinteressen und -problemen, die sich verstärkt auf die systemische Organisation länderübergreifender Produktionszusammenhänge durch den Einsatz umfassender Techniklösungen richten. Ein zentrales Problem solcher Rationalisierungsstrategien ist, die Kompatibilität bislang nationalspezifisch entwickelter Teilsysteme durch ihre Angleichung und Weiterentwicklung nach international gültigen Standards und Normen herzustellen. Zunehmend gefördert und beschleunigt werden solche Prozesse internationalisierter Technikentwicklung schließlich durch supranationale Technologieförderinstitutionen, die in Westeuropa im Rahmen der EG-Institutionen in den letzten Jahren massiv auf- und ausgebaut wurden und die Möglichkeiten einer nationalspezifischen staatlichen FuE-Politik zunehmend überformen (z.B. Hack 1988, S. 119 ff.). Damit werden vor allem die bislang nationalstaatlich organisierten und, wie gezeigt, durch spezifische Besonderheiten geprägten einzelstaatlichen FuE-Systeme nicht nur ergänzt, sondern teilweise außer Kraft gesetzt.

Gleichsam als Kehrseite dieser Internationalisierung und ihrer zwangsläufig hohen Distanz zu praktischen Anwendungsproblemen kann eine fortschreitende Spezialisierung der Technikentwicklung auf branchen- oder auch regionalspezifische Erfordernisse und Bedingungen vermutet werden. Denn erforderlich wird ein Technikangebot für Anwendungsfelder, die von den international agierenden Herstellern nicht abgedeckt werden bzw. aufgrund ihres begrenzten Absatzvolumens für diese uninteressant sind. Gegenüber nationalspezifischen oder international sich herausbildenden Innovationsmustern kommen in diesem Kontext möglicherweise bislang nur nachgeordnete, je besondere Anwendungserfordernisse zum Tragen, die aufgrund der generell wachsenden Bedeutung kleinerer und mittlerer Anwenderbetriebe an Bedeutung gewinnen. Nicht überraschend wäre daher auch, wenn in diesem Zusammenhang vermehrt Entwickler mit einer genauen Kenntnis nur bestimmter Betriebs- und Produktionstypen auf dem Technikmarkt auftreten und damit den Kern neuartiger, regionaler Innovationsmuster bilden.

Insgesamt ist ein Wandel fertigungstechnischer Innovationsmuster aufgrund veränderter sozioökonomischer Bedingungen und fortschreitender Verwissenschaftlichung unübersehbar. Offen ist freilich, ob die bisherigen nationalspezifischen Muster tatsächlich nachhaltig an Bedeutung zu verlieren beginnen und ob mit den Schlagworten Internationalisierung einerseits, Regionalisierung andererseits schon zureichend neue Innovationsstrukturen bezeichnet werden können. Offen muß weiterhin bleiben, welche fertigungstechnischen Konzepte unter derart sich wandelnden Bedingungen entwickelt werden. Unbeantwortet bleiben muß schließlich auch die Frage, inwieweit sich der bislang nationalspezifisch bestimmte wechselseitige Zusammenhang zwischen Gesellschaftsstrukturen und der institutionellen Seite von Innovationsmustern aufzulösen beginnt und in welcher Weise nationalspezifische Gesellschafts- und Industriestrukturen in Zukunft fertigungstechnische Entwicklung bestimmen und ihrerseits von Technikentwicklung beeinflusst werden.

IX. Technischer Wandel und sozioökonomische Dynamik

Die Entwicklung der NC-Technik in den USA und der Bundesrepublik folgte seit den 50er Jahren Pfaden, die sich deutlich voneinander unterscheiden: In der USA erfolgte sie auf dem Niveau einer hohen technischen Komplexität, auf der Basis einer möglichst umfassenden Ausschöpfung der Potentiale der Informatik und Computertechnologie und mit dem Ziel einer hohen Automatisierung von Produktionsprozessen. Steuerungssysteme, die sich auf eine an differierende Anwendungsbedingungen anpaßbare und mit "Lücken" versehene Automatisierung richteten, hatten demgegenüber in den USA den Charakter von Nischenkonzepten, die zu keiner Zeit in größerem Umfang und kontinuierlich verfolgt wurden. Dies gilt, wie gezeigt, nicht nur für die NC-Entwicklung, sondern auch für die spätere, auf der NC-Technik fußende Entwicklung rechnergestützter und rechnerintegrierter Produktionssysteme.

In der Bundesrepublik hingegen folgte die NC-Technik Entwicklungspfaden, die sich durch eine begrenzte Komplexität und eine eingeschränkte Automatisierung auszeichneten und die auf den Einsatz der neuen Technik unter den unterschiedlichsten industriellen Anwendungsbedingungen zielten. Ausgesprochen werkstattorientierten Lösungen, die sich durch eine hohe Einsatzflexibilität sowie Automatisierungslücken auszeichneten, kam demzufolge eine große Bedeutung zu. Diese Steuerungslösungen waren daher auch die Basis für den Innovationssprung in der zweiten Hälfte der 70er Jahre und die dann folgende schnelle Weiterentwicklung dieser Technik in der Bundesrepublik. Im gleichen Zeitraum verharrte hingegen die amerikanische NC-Entwicklung weitgehend in ihren seit den 50er Jahren vorgezeichneten Bahnen und erwies sich als insgesamt nur wenig innovativ.

Diese Entwicklungspfade der NC-Technik verliefen in beiden Ländern in verschiedenen Arrangements von Entwicklern, Herstellern und Anwendern, die ihrerseits eingebettet waren in ebenso verschiedene sozioökonomische Strukturbedingungen. Analytisch gefaßt als fertigungstechnische Innovationsmuster lassen sich die relevanten sozialen Bestimmungsgrößen

der fertigungstechnischen Entwicklung in den beiden Ländern wie folgt zusammenfassen:

(1) Fertigungstechnische Innovationen in den USA der Nachkriegszeit kamen nahezu ausschließlich unter dem Einfluß wissenschaftlicher und militärischer Akteure zustande. Die Entwicklerkonstellation umfaßte einerseits mächtige, spezialisierte und marktferne Anwenderbetriebe aus der Luft- und Raumfahrtindustrie, andererseits schließt sie Akteure ein, die aus einem Verbund großer wissenschaftlicher Institute der Informatik, Computer- und Steuerungstechnologie, einigen wenigen Großbetrieben des Werkzeugmaschinenbaus und der Elektro- und Elektronikindustrie bestanden. Hinzu kamen vor allem aber die militärisch-staatlichen Auftraggeber im Rahmen der vom Department of Defense finanzierten Investitions- und Entwicklungsprogramme. Dieses institutionelle Arrangement basierte auf sozioökonomischen Strukturbedingungen, deren besondere Ausprägung in der Nachkriegszeit nicht zuletzt Resultat des infolge des Kalten Krieges massiv ausgeweiteten, hauptsächlich auf Rüstungsproduktion ausgerichteten Staatsinterventionismus war. Weitere wichtige gesellschaftliche Strukturbedingungen für den spezifischen Entwicklungsverlauf von Fertigungstechnik waren: die ausgebaute Rüstungsindustrie und die Ausrichtung des gesellschaftlichen FuE-Aufwandes auf militärische Großforschung, ein wissenschaftlich und praxisfern orientiertes technisches Personal und ein Bildungssystem, das durch die Dominanz schulischer Ausbildungsgänge und die Erosion berufspraktischer Ausbildung gekennzeichnet ist.

(2) Als Komplement dazu, daß sich nahezu sämtliche fertigungstechnischen Innovationsressourcen in den militärisch-wissenschaftlichen Institutionen bündelten, ist die nur sehr geringe Innovationsfähigkeit des zivilen Innovationsmusters zu begreifen. Institutionell war es von festgefügteten Hersteller-Anwender-Beziehungen zwischen der Masse kleinerer und mittelgroßer Werkzeugmaschinenbetriebe und den dominanten Großanwendern der metallverarbeitenden Massengüterherstellung mit ihren taylorisierten Produktionsprozessen geprägt. Sozioökonomisch entsprach dieses Innovationsmuster dem fordistischen Modell der Massenproduktion, das sich marktwirtschaftlich durch den großen und stabilen Absatzmarkt im Inland sowie betriebsinterne Arbeitsmarktstrukturen mit nur gering qualifizierten Arbeitskräften auszeichnet.

(3) In der Bundesrepublik hingegen verlief die fertigungstechnische Entwicklung der Nachkriegszeit in institutionellen Strukturen, die von einer engen Verschränkung von fertigungsorientierter Grundlagenforschung, anwendungsbezogener Forschung und Entwicklung und praktischer, im Produktionsprozeß gewonnener Erfahrung gekennzeichnet sind. Technikentwicklung erfolgte unter dem bestimmenden Einfluß von Anwendererfordernissen, die nicht von der ausschließlichen Dominanz einzelner Branchen oder gar einzelner Großunternehmen, sondern von einem breiten Feld industrieller Anwender und insbesondere von der hohen Exportorientierung der deutschen Industrie geprägt wurde. Tragender Akteur war dabei der Werkzeugmaschinenbau, der rückgebunden an die Anwendererfordernisse auf der Basis vergleichsweise hoher Innovationsressourcen, die aus dem Wissenschaftssystem bereitgestellt wurden, relativ autonome Innovationsanstöße zu geben vermochte. Sozioökonomische Voraussetzungen dieses institutionellen Zusammenhangs sind bis heute eine auf die Investitionsgüterindustrie ausgerichtete Industriestruktur mit heterogenen und wenig strukturierten Arbeitsprozessen, berufsfachliche Arbeitsmärkte und eine hohe Verfügbarkeit über qualifizierte Produktionsarbeiter. Diese spezifischen Arbeitsmarktstrukturen wiederum bilden die Basis für die zugleich wissenschaftliche und industriepraktische Ausrichtung des technischen Personals und seine überwiegend beruflichen Reproduktionsverläufe.

Die Dynamik der Innovationsmuster unterschied sich daher beträchtlich. In den USA führte sie in eine Sackgasse: Im Fall des wissenschaftlich-militärischen Innovationsmusters verhinderten die Abschottung von zivilen Anwenderinteressen und Marktmechanismen sowie die ausgeprägte Stabilität der Entwicklerkonstellation ein Verlassen der einmal eingeschlagenen technischen Entwicklungspfade; angesichts der sich seit den 70er Jahren tiefgreifend wandelnden Anwenderinteressen erwiesen sich die entwickelten Techniken unter zivilen Bedingungen als kaum nutzbar. Dem zivilen Innovationsmuster hingegen mangelte es in seiner Ausrichtung auf die wenig innovativen Massengüterhersteller an Anstößen und Ressourcen, um Innovationsmaßnahmen einzuleiten und sie systematisch verfolgen zu können. Demgegenüber erwies sich das deutsche Innovationsmuster mit seiner weit gefächerten Anwender- und Marktausrichtung und den auf Kundenanforderungen ausgerichteten technischen Lösungen zumindest bis zum Ende der 80er Jahre als sehr anpassungsfähig an die sich wandelnden industriellen Anwendungsbedingungen. Eine offene Frage ist

allerdings, inwieweit das deutsche Innovationsmuster auch in Zukunft in der Lage sein wird, die sich weiterhin wandelnden Anforderungen der Anwender einerseits und die zunehmende Breite technologisch-wissenschaftlicher Potentiale und technischer Gestaltungsalternativen andererseits zu bewältigen.

In den nationalspezifischen Innovationsmustern ist die fertigungstechnische Entwicklung eng mit institutionell-politischen und gesellschaftsstrukturellen Momenten verknüpft. Dieser Zusammenhang bestimmt die Entwicklungspfade der Fertigungstechnik. Weitgehend offen blieb bislang allerdings, welche Faktoren die sozioökonomische Dynamik in ihrer Gesamtheit bestimmen und in welcher Weise die fertigungstechnischen Innovationsmuster mit dieser verknüpft sind. Abschließend soll daher die Frage nach der sozioökonomischen Dynamik der Nachkriegszeit und ihre Bestimmungsfaktoren aufgegriffen werden. Davon ausgehend, soll gefragt werden, über welche Mechanismen der fertigungstechnische Wandel auf die ökonomische Dynamik zurückwirkt und unter welchen Bedingungen er Wachstumspotentiale und Wachstumspfade beeinflussen und eröffnen kann. Beide Aspekte können an dieser Stelle allerdings kaum umfassend behandelt werden. Es sollen im gegebenen Rahmen lediglich begründete Fragen formuliert und als zentral erachtete Zusammenhänge angerissen werden, ohne den Anspruch einer erschöpfenden Erklärung zu verfolgen.

1. Zur ökonomischen Dynamik der Nachkriegszeit

Rahmenbedingung fertigungstechnischer Innovationsmuster ist die generelle Dynamik kapitalistischer Entwicklung, die vom Verwertungs- und Akkumulationsprozeß des Kapitals geprägt ist. Bezeichnet werden hiermit die organisierenden Prinzipien und die bestimmenden Kräfte der gesellschaftlichen Dynamik (Kern 1989), ohne freilich historische Diskontinuitäten und länderspezifische Ungleichzeitigkeiten der industriell-kapitalistischen Entwicklung zu berücksichtigen. Auf Diskontinuitäten in historischer Perspektive stellen die verschiedenen Spielarten der ökonomischen Theorie der "langen Wellen" kapitalistischer Entwicklung von Konradieff über Schumpeter, Trotzki bis hin zu Mandel ab, die angesichts der Krisensituation der letzten Jahre verstärkt in der gesellschaftstheoretischen Diskussion Beachtung finden (z.B. Kleinknecht 1984). Die dort auf-

geworfene Frage nach der Krisen- und Wachstumsdynamik historisch unterscheidbarer Phasen wirtschaftlicher Entwicklung läßt sich allerdings allein durch den Rückgriff auf die Gesetzmäßigkeiten ökonomischer Entwicklung kaum beantworten. Vielmehr ist die Analyse des gesamten gesellschaftlichen Strukturzusammenhangs erforderlich, in die die ökonomischen Prozesse eingebettet sind.

Diesen Zusammenhang greifen instruktiv die neueren Arbeiten aus dem Umfeld der "Regulationsschule" auf (zusammenfassend z.B.: Mahnkopf 1988; Hübner 1989). In ihrer Terminologie wird bekanntermaßen von historisch unterscheidbaren "Akkumulationsregimes" gesprochen, in deren Rahmen in je spezifischer Weise der Zusammenhang zwischen Produktion und Konsumtion und damit der Akkumulationsprozeß des Kapitals durch bestimmte politisch-institutionelle Regulationsformen hergestellt und über längere Zeit gesichert wird.

Obleich nicht immer eindeutig gefaßt, wird mit dem Begriff des Akkumulationsregimes danach auf bestimmte Wachstumsperioden abgestellt, die einem typischen Verlaufsmuster gehorchen und deren Anfang und Ende jeweils durch eine "große Krise" markiert werden. Während dazwischenliegende konjunkturelle Tiefpunkte, sogenannte "kleine Krisen", durch die einem bestimmten Akkumulationsregime inhärenten Anpassungsmechanismen bewältigt werden können, kennzeichnet sich eine große Krise dadurch, daß die vorhandenen Regulationsformen nicht mehr ausreichen, die Krise zu überwinden. Erforderlich wird daher die Bildung von veränderten Regulationsformen, die eine neue Wachstumsperiode einleiten und die den Kern eines neuen Akkumulationsregimes ausmachen. Mit Regulationsformen wird dabei die jeweils geltende institutionelle Ausprägung grundlegender Gesellschaftsbeziehungen wie Lohnverhältnis, Konkurrenz- und Kapitalbeziehung, Geld und Währungssysteme und die jeweils vorherrschende Form des Staatsinterventionismus bezeichnet (Lutz 1984, S. 50 f.). Diese Zusammenhänge werden insbesondere für das als "Fordismus" begriffene Akkumulationsregime der Nachkriegszeit entwickelt, das bis weit in die 70er Jahre hinein in allen westlich-industrialisierten Ländern eine historisch beispiellose wirtschaftliche Prosperität schuf.

Seine besondere Dynamik bezog dieses Akkumulationsregime aus dem Zusammenwirken von zwei Momenten: Zum einen ist das hervorste-

chende Merkmal seiner Regulationsformen ein politisch-institutionelles System der kontinuierlichen Lohnsicherung und Lohnsteigerung, das die lohnsenkende Funktion der industriellen Reservearmee und das darauf basierende "Lohngesetz" außer Kraft setzte. Zum zweiten wurden dadurch Nachfragestrukturen und Marktbedingungen geschaffen, die einen kalkulierbaren und kontinuierlich sich erweiternden Absatz industriell gefertigter Waren erlaubten. Damit unterscheidet sich der Fordismus von historisch vorangehenden Akkumulationsregimes vor allem durch die Ausweitung von Warenbeziehungen und das Aufkommen des Massenkonsums.¹ Die dem Fordismus mithin eigentümliche Dynamik liegt in den Marktbeziehungen und den Warenströmen zwischen sich verändernden Märkten. Erst die politisch-institutionell stabilisierten Marktstrukturen ermöglichten nachhaltige Veränderungen im Verwertungs- und Akkumulationsprozeß des Kapitals, insbesondere das Aufkommen von Industrien der Massenproduktion mit ihren taylorisierten Produktionsprozessen und der damit verbundenen Bildung von Großbetrieben und international agierenden Konzernen.

Fraglos werden damit zentrale Momente der Dynamik der kapitalistischen Nachkriegsprosperität benannt, doch bleiben nationalspezifische Ungleichzeitigkeiten des fordistischen Akkumulationsregimes weitgehend ausgeblendet. Folgt man der vorliegenden Literatur, so lassen die der Regulationsschule zuzurechnenden Studien - obgleich in der Logik des Konzepts angelegt - die besonderen Erscheinungsformen der kapitalistischen Entwicklung in verschiedenen Ländern weitgehend außer acht (Scherrer 1992, S. 56). Bei der Analyse der sozioökonomischen Dynamik der Nachkriegszeit bleiben damit nicht nur die spezifischen Divergenzen in verschiedenen Ländern ausgeblendet, sondern auch theoretisch so wichtige Fragen wie die nach dem wechselseitigen Zusammenhang länderspezifischer Divergenzen und ihrem Einfluß auf die jeweilige ökonomische Dynamik werden kaum aufgegriffen.

-
- 1 Historisch wird dieses sogenannte "vorwiegend intensive Regime der Akkumulation" von einem, auf die ersten Jahrzehnte dieses Jahrhunderts datierten "vorwiegend extensiven Regime der Akkumulation" unterschieden, dessen Reproduktion auf der ständigen Rationalisierung der Produktion bei weitgehender Beibehaltung der traditionellen Lebens- und Konsumweise großer Bevölkerungsteile basierte. Der Widerspruch zwischen dem damals schnellen Anstieg von Produktivität und der Stagnation des Massenkonsums war eine zentrale Krisenursache des extensiven Akkumulationsregimes (Hübner 1989).

Dieser Aspekt ist insbesondere für die international vergleichende Analyse der ökonomischen Nachkriegsentwicklung von einigem Gewicht. Denn in den Jahrzehnten nach dem Zweiten Weltkrieg stand die industrielle Entwicklung der meisten westlichen Länder, insbesondere jedoch die Westdeutschlands, unter dem bestimmenden ökonomischen und - bis heute - politischen und kulturellen Einfluß der Hegemonialmacht USA. Versucht man, diesen Zusammenhang zu erklären, so müssen vor allem folgende Momente Berücksichtigung finden:

Die ökonomische Basis der Hegemonialposition der USA war das System der Massenproduktion, das in den USA bis ins 19. Jahrhundert zurückreicht (Hounshell 1991). Seine Entstehungsbedingung war der große und sich kontinuierlich ausweitende Binnenmarkt, der auf dem schon im letzten Jahrhundert in die Warenproduktion einbezogenen landwirtschaftlichen Sektor und auf den für den Markt produzierenden Bauern sowie auf der frühen Herausbildung einer städtischen Angestelltenschicht beruhte. Insbesondere ein vergleichsweise hoher Kommerzialisierungsgrad der kleinbäuerlichen Landwirtschaft, der kontinentale Charakter des schon frühzeitig sich arbeitsteilig entwickelnden Binnenmarktes und hohe Präferenzen der Nachfrage für standardisierte Güter sind wichtige Antriebsmomente für das Aufkommen der ersten Massengüterindustrien - beispielsweise für Nahrungsmittel und Textilien - schon während und nach dem amerikanischen Bürgerkrieg und dem damit zusammenhängenden Ausbau der Investitionsgüterindustrie (Hurtienne 1988, S. 206 ff.). Ein sogenannter Strukturdualismus zwischen einem industriell-marktwirtschaftlichen und einem landwirtschaftlich-traditionellen Sektor, wie er in Europa bis weit in die 50er Jahre dieses Jahrhunderts hinein existierte, gab es in den USA - sieht man einmal von regionalen Differenzen ab - von Anbeginn der Industrialisierung an offensichtlich nicht (Lutz 1984, S. 138).

Gestützt und stabilisiert wurde die wachsende Massennachfrage innerhalb der USA spätestens seit den 30er Jahren durch ein System der Lohnfestsetzung, das aus dem Aufstieg der Gewerkschaften in den Industriezweigen der Massenproduktion und der damit zusammenhängenden Ausbreitung von Kollektivverträgen hervorging. Bestimmt von Lohnvereinbarungen in der Automobilindustrie setzten sich über eine Vielzahl institutioneller - nur teilweise staatlich gestützter - Mechanismen gesamtwirtschaftlich kontinuierliche Lohnsteigerungen durch, die an Produktivitätssteigerung und Inflationsrate gebunden waren und damit zu einer ebenso steti-

gen Kaufkraftherhöhung führten. Piore und Sabel sprechen daher bezogen auf die zivilen Massenmärkte in den USA von "keynesianischer Einkommenspolitik ohne keynesianischen Staat" (1985, S. 95).

Dabei stimulierte allerdings die staatliche Politik in Form der beschriebenen Rüstungswirtschaft massiv die Dynamik der amerikanischen Wirtschaft. Die Rüstung garantierte nicht nur sichere und kalkulierbare Gewinne, sondern sie mobilisierte vor allem brachliegende Kapitalien und Kapazitäten und wirkte damit der systemimmanenten, konkurrenzbedingten Tendenz, überschüssige Kapitalien und Kapazitäten zu schaffen, entgegen. Es entstanden zusätzliche Märkte: Zum einen für den Absatz der Rüstungsgüter, zum anderen aber auch für Konsumgüter durch die Einkommen der in der Rüstungsproduktion beschäftigten Arbeitskräfte (Baran, Sweezy 1973). Gleichzeitig gingen von der Rüstungswirtschaft Impulse für technische Innovationen aus, die zumindest in den ersten Jahren nach dem Zweiten Weltkrieg auch für die zivile Produktion und für die Absatzmärkte nutzbringend waren. Sieht man einmal von der Informatik und Computertechnologie ab, so waren sie später freilich - wie nicht zuletzt die NC-Technik zeigt - immer schwieriger in zivil nutzbare Techniken umzusetzen (Rödel 1972).

Beide Momente - die zivilen Industrien der Massenproduktion und die high-tech-orientierten Rüstungsbranchen - verfestigten sich auf Dauer zu jenem oben beschriebenen (Kap. V, 2.) industriestrukturellen Dualismus, der das Charakteristikum des amerikanischen Produktionsmodells der Nachkriegszeit ist. Mit seiner vorherrschenden Binnenkonzentrierung erklärt sich auch die weitgehende "Vernachlässigung" der Exportmärkte, die sich in der durchschnittlich niedrigen Exportquote der amerikanischen Industrie nicht nur in der Nachkriegszeit, sondern auch in den Jahrzehnten davor niederschlug; schon in der Zwischenkriegszeit machte zu keinem Zeitpunkt der Wert der Einfuhr oder der Ausfuhr mehr als 8 % des Volkseinkommens der USA aus (Faulkner 1957, S. 717). Aufgrund des im Vergleich zu anderen Ländern fortgeschrittenen Standes des amerikanischen Modells der Massenproduktion erwies sich jedoch die Erschließung ausländischer Märkte für eine ganze Reihe amerikanischer Industriezweige gleichsam als "Selbstläufer" und erforderte keine über ihre Binnenstrategien besonders hinausgehenden Anstrengungen (Piore, Sabel 1985, S. 84 f.); dies trifft sicherlich für den Werkzeugmaschinenbau mit seinen überdurchschnittlichen Exportquoten und für weitere Maschinenbaubranchen

mit Standardprodukten - wie beispielsweise Landmaschinen und Baumaschinen - in den 50er und 60er Jahren zu. Insgesamt aber konzentrierten sich die Exporte wertmäßig auf wenige Branchen, wozu vor allem auch die Rüstungsbranchen gehörten, und nur bei einer kleinen Anzahl von Unternehmen trug das Exportgeschäft maßgeblich zum Gesamtumsatz bei. In der Nachkriegszeit zählten neben den Standarderzeugnissen des Maschinenbaus Agrarprodukte, Chemieprodukte, elektronische Geräte und Flugzeuge zu den Hauptexportgütern der USA (Porter 1991, S. 308 ff.). Gefördert wurde diese Exportstärke der amerikanischen Industrie durch die institutionellen Regelungen des Welthandels der Nachkriegszeit, vor allem das dollar-zentrierte Weltwährungssystem von Bretton Woods und das Welthandelsabkommen GATT, die weitgehend an amerikanischen Interessen ausgerichtet waren (Thurow 1992, S. 14 ff.).

Im Kontext dieser hegemonialen Position der Vereinigten Staaten von Amerika stand die sozioökonomische Entwicklung Westdeutschlands. Vermittelt über die Konkurrenz des Weltmarktes war dabei zweifellos einmal die überragende ökonomische Leistungsfähigkeit der USA prägend; so war das Produktivitätsniveau Amerikas in den ersten Jahrzehnten nach dem Krieg mehr als doppelt so hoch wie dasjenige der Bundesrepublik (Altwater u.a. 1982, S. 32). Die Durchsetzung fordistischer Prinzipien in der industriellen Produktion der Bundesrepublik und die damit einhergehende schnelle Steigerung des Massenwohlstandes in den 50er und 60er Jahren standen aber zugleich in engem Zusammenhang mit politischen Entscheidungen und Einflüssen, die vor allem von der seit 1946/47 von den USA forciert betriebenen Politik der Westintegration Westdeutschlands bestimmt waren;² wichtige erste Schritte zur politisch-ökonomischen Integration wie Währungsreform und Marshallplan sind bekannt. Insgesamt drängten diese Maßnahmen auf eine starke Ausrichtung des westdeutschen Industrialisierungsprozesses auf das amerikanische Vorbild, und es entstand ein in der Bundesrepublik mächtiges politisches Interesse, den amerikanischen Prinzipien und Verfahren der Massenproduktion zum Durchbruch zu verhelfen. Sie galten als effiziente Produktionsform, und die Vorbilder der amerikanischen Industrie waren allen Fachleuten gewärtig und nicht zufällig galten gerade in den 50er und 60er Jahren ameri-

2 Grosso modo werden die politischen Einflüsse auf die Nachkriegsentwicklung Westdeutschlands in der einschlägigen sozialwissenschaftlichen Diskussion häufig unterschätzt (z.B.: Mandel 1972; Schmiede 1976; Altwater u.a. 1982).

kanische Managementprinzipien als beispielhaft. Darüber hinaus verband sich damit das Interesse, über einen sich schnell durchsetzenden Massenwohlstand die Attraktivität des Westens gegenüber dem Osten zu steigern und durch wohlfahrts- und sozialpolitische Maßnahmen die Arbeiterschaft in das westliche System zu integrieren.

Diese starken politischen Impulse konvergierten mit einer relativ günstigen industriestrukturellen Ausgangssituation, die von der Investitionsgüterindustrie geprägt war. Aufgrund ihrer während der NS-Zeit ausgebauten und von Kriegsschäden relativ verschonten Struktur konnte sie problemlos Nutznießer der nach dem Zweiten Weltkrieg weltweit rasch wachsenden Nachfrage nach Produktionsmitteln werden. Gefördert wurde diese schnell aufkommende Exportkonjunktur dabei durch weitere Momente wie die fortlaufende Unterbewertung der DM in den 50er und 60er Jahren und die damals vergleichsweise niedrigen Produktionskosten (Alt Vater u.a. 1982, S. 156 ff.).

Aus dem Zusammenspiel der politischen Impulse mit den strukturellen Ausgangsbedingungen und den schnellen Exporterfolgen der Investitionsgüterindustrie resultierten nachhaltige industrielle Wachstumsanstöße, die zudem nicht von Rüstungsausgaben und hohen Ausgaben für Rüstungsforschung behindert wurden. Es entstand eine wachsende Nachfrage nach Arbeitskräften, die wiederum zu einer steigenden Nachfrage nach industriell gefertigten Massengütern führte. Angestoßen wurde damit der Umbau und Ausbau von relevanten Teilen der Industrie zu einem "fordistischen Sektor" der Massenproduktion. Folgt man neueren Analysen (z.B. Bechtle, Lutz 1989, S. 36 ff.), so war dieser Umbau in seiner Gesamtheit gekennzeichnet von einer Abnahme der Beschäftigung in der Grundstoffherzeugung, einem schnellen Wachstum von Industriezweigen, in denen schon Ansätze zur Großserien- und Massenfertigung vorhanden waren, und erheblichen Strukturveränderungen in den Sektoren der Konsumgüterfertigung in Richtung ihrer Taylorisierung. Diese Strukturverschiebungen wiederum führten zu einer verstärkten Ausrichtung der Produzenten von Investitions- und Anlagegütern auf die neu entstehenden Industrien der Massenproduktion und erlaubten ihnen Produktionsstrukturen zu realisieren, die zumindest in Teilbranchen eine taylorisierte Serienfertigung möglich werden ließen.

Dieser industrielle Entwicklungsverlauf wurde gestützt von den in den 50er und 60er Jahren hohen Kapalexporten und Direktinvestitionen aus

den Vereinigten Staaten.³ Mit dem amerikanischen Kapitalexport und den Direktinvestitionen war nicht nur ein hoher Einfluß amerikanischer Technik und amerikanischen Know-how, vor allem von Managementwissen über die Strukturierung tayloristischer Produktionsprozesse und von Marketingmethoden über den Absatz industriell gefertigter Massengüter, verbunden, sondern die amerikanischen Investitionen konzentrierten sich auch auf die wachsenden Industriezweige der Massenproduktion (Mandel 1972, S. 10 ff.). Zugleich wurde dadurch die Importnachfrage nach modernen, für die Massenproduktion geeigneten Fertigungstechniken aus den USA angeregt. Ein Indiz hierfür ist der hohe Importanteil amerikanischer Werkzeugmaschinen an Gesamtimporten von Werkzeugmaschinen in den 50er und 60er Jahren in die Bundesrepublik; er überstieg teilweise einen Anteil von 30 % und umfaßte vor allem auch die Importe NC-gesteuerter Werkzeugmaschinen, die hauptsächlich für den Einsatz in tayloristisch strukturierten Produktionsprozessen ausgelegt waren.

Das Wachstum der Massengüterindustrien in der Bundesrepublik war jedoch unmittelbar gebunden an die Entwicklung eines aufnahmefähigen Binnenmarktes. Neben dem generell enormen Nachholbedarf an Konsumgütern basierte diese Marktentwicklung hauptsächlich auf der Auflösung und Integration eines in Deutschland bis dahin stabilen traditionellen Sektors in industriell-marktwirtschaftlich bestimmte Reproduktionszusammenhänge - von Lutz (1984) in Anschluß an Luxemburg als "innere Landnahme" gefaßt. Dieser im wesentlichen landwirtschaftliche Familienbetrieb, Handwerk, Einzelhandel und Hauswirtschaft umfassende Sektor diente in den vorangehenden Jahrzehnten - wie etwa in der Zwischenkriegszeit - immer wieder als Arbeitskräftereservoir für die Industrie, doch zeigte er sich gegenüber einer Ausweitung der kapitalistischen Produktionsweise als bemerkenswert stabil und erwies sich als Schranke für ein dauerhaftes ökonomisches Wachstum.⁴ Dieser Struktur dualismus wurde in der Nachkriegszeit jedoch überwunden: zum einen durch die ständig

3 Aus der Sicht der USA erwies sich dieser Kapitalexport als Ausweg für den damals im amerikanischen Inland hohen und offenbar trotz Wachstums des Rüstungssektors dort kaum mehr profitabel anlegbaren Kapitalüberschuß, die überseeischen Gewinne amerikanischer Unternehmen stiegen schnell, und die Verzinsung des im Ausland angelegten Kapitals aus den USA war häufig viel höher als die im Inland (Mandel 1972, S. 10 ff.).

4 Dieser Zusammenhang bezeichnet die Krisenanfälligkeit des oben so genannten extensiven Regimes der Akkumulation.

wachsende Nachfrage nach Arbeitskräften aus diesem Sektor, wodurch Kaufkraft und Nachfragepotential ständig erhöht wurden, zum anderen durch die intensivierten Wohlfahrts- und sozialstaatliche Politik. In dieser Politik schlug sich die Absicht nieder, die Loyalität der Arbeiterschaft gegenüber den Demokratien des Westens zu sichern und einer - vermeintlichen oder auch tatsächlichen - Attraktivität des östlichen Systems und der kommunistischen Parteien Westeuropas entgegenzuwirken.

Die staatliche Politik verhinderte, daß sich über die Wirkung des "Lohngesetzes" in Phasen konjunktureller Rückschläge die Strukturen des traditionellen Sektors wieder verfestigten; vermieden wurde, daß die in Rezessionsphasen vom industriellen Sektor freigesetzten Beschäftigten gezwungen wurden, in die Subsistenz wirtschaftlicher Reproduktionszusammenhänge dieses Sektors zurückzukehren und diesen damit einer weiteren industriellen Wachstumsdynamik zunächst einmal zu entziehen (Lutz 1984, S. 142 ff.). Indem dieser Depressionsmechanismus außer Kraft gesetzt wurde, wurde die Voraussetzung für eine kontinuierliche Modernisierung und industriell-kapitalistische Erschließung dieses Sektors geschaffen. Ergänzt wurde diese Verstetigung von Nachfrage, Wachstum und Wohlstandsentwicklung durch eine produktivitätsorientierte Lohnpolitik mit sektorialem Zuschnitt, die über das spezifische duale System der industriellen Beziehungen elastisch an variierende betriebliche Bedingungen angepaßt wurde.

Aufs Ganze gesehen blieb jedoch der Export, insbesondere in Zusammenhang mit der Entstehung der EG und des westeuropäischen Marktes, der bestimmende Motor der ökonomischen Dynamik in Westdeutschland. Neben der Ausweitung der Produktionsmittelexporte richteten sich sehr bald auch die zunächst nur binnenwirtschaftlich orientierten Massenindustrien auf den Export aus. Bis Mitte der 70er Jahre kann von einer geteilten Exportkonjunktur gesprochen werden: Massenindustrien wie der Straßenfahrzeugbau, die Herstellung elektrotechnischer Massengüter oder auch die Textil- und Bekleidungsindustrie steigerten ihre Exportquoten von einem niedrigen Ausgangsniveau aus beträchtlich; so betrug die Exportquote im Straßenfahrzeugbau Anfang der 50er Jahre durchschnittlich 20 % und in der ersten Hälfte der 70er Jahre deutlich über 40 %. Der Maschinenbau hingegen steigerte seine seit jeher hohen Exportquoten im gleichen Zeitraum von ca. 30 auf knapp 40 % (Glasstätter 1977, S. 205). Dabei erwies sich der Export bis weit in die 70er Jahre hinein als krisenkompensatorisch. Neben anderen Rezessionsphasen zeigt sich dies insbe-

sondere in der Krise von 1966/67, als ein asynchroner Verlauf verschiedener Länderkonjunkturen eine schnelle wirtschaftliche Erholung in der Bundesrepublik ermöglichte (Altwater u.a. 1982, S. 163 ff.).

Das Zusammenwirken dieser ökonomischen und politischen Einflußfaktoren war ohne Frage eine zentrale Ursache für das schnelle Wachstum und die Angleichung der ökonomischen Leistungsfähigkeit der Bundesrepublik an die der Vereinigten Staaten, die sich an den hohen Produktivitätssteigerungen bis zu den 70er Jahren festmachen läßt. So betrug das Produktivitätswachstum der industriellen Fertigung in den zehn Jahren zwischen 1964 und 1973 in der Bundesrepublik jahresdurchschnittlich mehr als 4 %, wohingegen dieser Wert für die USA bei deutlich unter 3 % lag. Eingebettet war diese Entwicklung in den Prozeß einer generellen Angleichung des Produktivitätsniveaus zwischen den westlich-industrialisierten Ländern. Dies betraf die EG-Länder insgesamt - wie vor allem auch Japan, dessen Produktivitätswachstum in dem genannten Zeitraum bei durchschnittlich mehr als 7 % lag (Dertouzos u.a. 1989, S. 41 ff.).

In dieser Wachstumsdynamik lagen zugleich aber auch die Ursachen der kommenden Krise und der damit verbundenen Erosion des fordistischen Akkumulationsregimes. Unübersehbar sind vor allem die Tendenzen der Marktsättigung: Auf dem Binnenmarkt der Bundesrepublik war in den 70er Jahren die Absorption des traditionellen Sektors weitgehend abgeschlossen, auf dem Weltmarkt verschärfte sich die Konkurrenz durch das Aufkommen weiterer, neu industrialisierter Länder beträchtlich. Gleichzeitig begann sich die Struktur der Welthandelsbeziehungen zu verschieben, indem sich die zuvor komplementär, auf die USA ausgerichteten Warenbeziehungen, bei denen es Wachstumschancen für alle beteiligten Länder gab, immer mehr anglichen (Thurow 1992, S. 28 ff.). Folge war, daß die Vereinigten Staaten ihre ökonomische Hegemonialstellung zu verlieren begannen; nicht nur bei Investitionsgütern wie Werkzeugmaschinen, sondern auch bei Massenkonsumgütern verschlechterte sich die Konkurrenzfähigkeit der USA auf dem Welt- wie auch auf dem Binnenmarkt beträchtlich, und die Produktion und der Export von High-Tech-Gütern auf der einen Seite und von Agrargütern auf der anderen Seite boten hierfür nur begrenzte Kompensationsmöglichkeiten. Dieser Prozeß einer relativen Angleichung der Position der USA an die anderer Länder ist bis heute nicht abgeschlossen und zieht unter anderem erhebliche politisch-institutionelle Friktionen im Welthandelssystem nach sich.

2. Der Einfluß des fertigungstechnischen Wandels auf die ökonomische Dynamik

Die skizzierte sozioökonomische Dynamik der Nachkriegszeit bezeichnet strukturelle Rahmenbedingungen der fertigungstechnischen Entwicklung. Im folgenden soll die Frage aufgegriffen werden, über welche Wechselbeziehungen und vermittelnde Mechanismen der technische Wandel mit der sozioökonomischen Dynamik verschränkt ist. Denn es kann nicht allein davon ausgegangen werden, daß Technikentwicklung einem von ökonomischen Anstößen induzierten Pfad und insofern ökonomisch vorgezeichneten Entwicklungschancen folgt, sondern wichtig ist auch der umgekehrte Mechanismus: nämlich die stimulierende Rolle des technischen Wandels für die ökonomische Dynamik. Denn wie gezeigt, ist Technikentwicklung nicht allein erklärbar über Rationalisierungsinteressen und Marktbeziehungen, sie ist vielmehr ein komplexer Such- und Auswahlprozeß, der in seinen einzelnen Phasen mit den verschiedensten politischen und gesellschaftlichen Momenten in Wechselwirkung steht.

Resümiert man die neuere ökonomische Diskussion zum Verhältnis von technischem Wandel und ökonomischer Theorie (z.B. Rosenberg 1982; Coombs u.a. 1987; Dosi u.a. 1988), so zeigt sich, daß in den verschiedenen Spielarten der Theorie ökonomischem Wachstum zwar die enge Wechselbeziehung zwischen ökonomischen Wachstum und dem technischen Wandel betont wird, dabei jedoch hochaggregierte quantitative Zusammenhänge im Vordergrund stehen. Gefragt wird etwa, welche Effekte der technische Wandel für Produktivitätssteigerung, Kostensenkung, Kapitalersparnis und neue Chancen für Kapitalanlage hat. Nicht näher gefragt wird aber nach qualitativen Zusammenhängen: Die eigentlichen Ursachen des technischen Wandels werden vielfach als außerhalb der ökonomischen Sphäre liegend angesehen bzw. werden in sehr vereinfachten Modellen wie die des "Technology push" und "Demand pull" verortet. Zusammenhänge und Mechanismen, die über die Richtung, Diffusion und die Effekte neuer Techniken entscheiden, bleiben ausgeblendet; technischer Wandel wird - so vermerkt Rosenberg kritisch - als "Black box" in ökonomischen Austauschprozessen behandelt (Rosenberg 1982).

Dies gilt nicht zuletzt für jene Varianten der ökonomischen Theorie der langen Wellen, die - Schumpeter folgend - dem technischen Wandel einen zentralen Einfluß auf die ökonomische Dynamik zuschreiben. Bekanntlich

sieht Schumpeter in radikalen technischen Neuerungen die Hauptquelle ökonomischen Wachstums und eines Wiederaufschwungs nach einer depressiven Phase. Das Entstehen von Innovationen schreibt er jedoch letztlich kontingenten Faktoren wie dem individuellen Unternehmer oder - in späteren Fassungen - routinisierten Innovationsprozessen großer Unternehmen zu (Freeman 1988). Sein besonderes Augenmerk richtet er zudem lediglich auf diskontinuierlich verlaufende "Sprunginnovationen" und blendet die Masse kontinuierlich und inkrementell verlaufender Innovationsprozesse aus (Rosenberg 1982, S. 5 ff.). Ähnlich kritisch sind auch neuere Varianten der Theorien der langen Wellen zu sehen (z.B. Mensch 1975; Freeman u.a. 1982; Mandel 1983). Sie unterscheiden sich zwar in Hinblick auf die Frage, in welcher Phase - Abschwung oder Aufschwung - technische Neuerungen einsetzen und die ökonomische Entwicklung stimulieren, doch bleibt auch hier die Frage nach dem Zustandekommen von Innovationen ausgeblendet (zusammenfassend: Coombs 1984): So nimmt Mandel an, daß der Wandel von Wissenschaft und Technologie in enger Wechselbeziehung mit den rhythmischen Bewegungen der Kapitalakkumulation steht und daß insbesondere die intensive Nutzung verfügbaren Wissens neuer Technologien - eine "technische Revolution" - am Beginn einer neuen expansiven langen Welle steht. Die Frage nach der Entstehung von technischen Innovationen und ihren Wirkungsmechanismen sieht er jedoch offensichtlich mit dem Verweis auf die Zwänge der Kapitalakkumulation beantwortet. Auch die Regulationstheoretiker vermögen nur unzureichende Antworten zu geben. Zwar spielt ihren Überlegungen zufolge der technische Wandel eine wichtige Rolle im Prozeß des Aufstiegs und des Niederganges eines Akkumulationsregimes, jedoch umgehen sie die Frage nach den Voraussetzungen technischer Innovationen und ihrer jeweiligen Verschränkung mit der ökonomischen Dynamik. Vielmehr interessiert sie dieser Einflußfaktor nur im Zusammenspiel mit den verschiedenen institutionellen Regulationsformen und seinen davon ausgehenden Beiträgen für die jeweilige historisch-spezifische Stabilität des Gesamtsystems (Boyer 1988; Bieber, Möll 1993, S. 26 ff.).

Einzig die auf dem von Williamson und anderen (z.B. Williamson 1985) entwickelten Transaktionskostenansatz basierenden Überlegungen aus dem Feld der "Neuen Institutionellen Ökonomie" versuchen, ausgehend vor allem von einer Kritik an neoklassischen Annahmen, situative und institutionelle Vermittlungsmechanismen für den Verlauf und die Effekte technischen Wandels in die theoretischen Argumente einzubeziehen.

Nicht zuletzt sind in diesem Feld auch die Kategorien der "technological paradigms" und "technological trajectories" zu verorten, mit denen der selektive Einfluß ökonomischer in Verbindung mit institutionellen und sozialen Einflußfaktoren auf den technischen Wandel der Analyse zugänglich gemacht werden soll (Dosi 1982; 1984) und die oben zur Begründung der Kategorie der "fertigungstechnischen Entwicklungspfade" herangezogen wurden (Kap. II, 5.). Aus soziologischer Perspektive ist hier jedoch kritisch anzumerken, daß ökonomischen Einflußfaktoren nach wie vor ein hoher, wenn nicht dominanter Einfluß zugeschrieben wird und die Austauschmechanismen zwischen den an Technikentwicklung beteiligten Institutionen und kollektiven Akteuren auf funktionalistisch vereinfachte Annahmen reduziert werden. Vernachlässigt werden so zentrale Fragen wie die nach den Entstehungsgründen von institutionellen Arrangements und vor allem den damit verbundenen Macht- und Interessenbeziehungen, die - wie nicht zuletzt auch die vorliegenden Befunde über die fertigungstechnische Entwicklung zeigen - unabhängig von ökonomischen Funktionsweisen wirksam sind, aber ihrerseits ökonomische Strukturen prägen.⁵

Auf diese offenen Fragen bezieht sich die abschließende Argumentation.⁶ Will man den wechselseitigen Zusammenhang zwischen fertigungstechnischer Entwicklung und ökonomischer Dynamik genauer beleuchten, so geben Rosenbergs (1975) Überlegungen über die Entstehung der amerikanischen Werkzeugmaschinenindustrie und die Entwicklung und Verbreitung von Werkzeugmaschinentechniken während des Industrialisierungsprozesses im 19. Jahrhundert wichtige Hinweise. Rosenberg zufolge ist der Zusammenhang zwischen fertigungstechnischer Entwicklung und industriellem Wachstum als zweistufiger anzusehen: Einerseits gehen Entwicklungsanstöße von einzelnen Betrieben aus, die ein spezielles Anwendungsinteresse an bestimmten, im Prinzip verfügbaren Technologien entwickeln. Andererseits werden die daraus resultierenden, zunächst immer nur spezifischen Werkzeugmaschinentechniken verallgemeinert, insofern als sie im Zuge des industriellen Wachstumsprozesses in den ver-

-
- 5 Vergleiche hierzu die überzeugende Kritik Mahnkopfs an dem ökonomisch verkürzten Verständnis von Austausch und Kooperationsbeziehungen der Neuen Institutionellen Ökonomie (Mahnkopf 1993).
 - 6 Dabei geht es allerdings nach wie vor um fertigungstechnische Entwicklung. Denn in der Unschärfe dessen, was mit Technik jeweils gemeint ist, liegt ein weiteres Defizit der ökonomischen Diskussion und, wie schon ausgeführt, häufig auch der sozialwissenschaftlichen Technikgeneseforschung.

schiedensten Industrien zur Rationalisierung und Produktivitätssteigerung nutzbar gemacht werden. Diesen Vorgang faßt Rosenberg als "technologische Konvergenz"; gemeint ist damit, daß die gleichen oder ähnlichen technologischen Prinzipien und Verfahren in den verschiedensten, im Zuge der Industrialisierung sich fortlaufend ausdifferenzierenden Industriesektoren Verwendung finden. Rosenberg beschreibt diesen Prozeß am Beispiel der Diffusion und ständigen Verbesserung der Revolverdrehbank und der Universalfräsmaschine. Die Entwicklung dieser Techniken nahm im 19. Jahrhundert ihren Ausgangspunkt bei der Waffenherstellung, um dann mit ständiger Anpassung und Weiterentwicklung in die Industrien der Nähmaschinenproduktion, Fahrradherstellung und schließlich der Automobilproduktion zu diffundieren. Diese Werkzeugmaschinen bildeten als verallgemeinerte Techniken eine wichtige fertigungstechnische Voraussetzung dafür, daß überhaupt erst Massenproduktion möglich wurde (Rosenberg 1975, S. 224 ff.; Hounshell 1991).

Kern des Vorgangs technologischer Konvergenz verschiedener Industriezweige und Produktionsprozesse ist mithin der Transfer gleicher oder ähnlicher technologischer Prinzipien und Verfahren wie Fräsen, Drehen oder Schleifen von einzelnen, für spezialisierte Anwendungsfälle ausgelegten Maschinen und Anlagen hin zu generellen, in verschiedenen Industriezweigen und Prozeßtypen nutzbaren Fertigungstechniken. Dieser Prozeß des Transfers von Fertigungstechnik ist damit Voraussetzung wie auch Folge des industriellen Wachstumsprozesses, da er ökonomische Entwicklungsmöglichkeiten eröffnet und zugleich Resultat einer wachsenden Nachfrage nach neuen Fertigungstechniken ist. Wesentlicher Akteur war - so Rosenberg - die im 19. Jahrhundert aufkommende Werkzeugmaschinenindustrie, von deren Entwicklungs- und Innovationsfähigkeit es entscheidend abhing, daß die kostensenkenden und kapitalsparenden fertigungstechnischen Innovationen in der Industrie rasch diffundierten und ökonomisches Wachstum stimulierten.

Eine ökonomisch wirksame Durchsetzung neuer Fertigungstechniken erweist sich freilich als voraussetzungsvoller Vorgang: Zum einen muß eine hinreichende Kompatibilität zwischen den Lösungspotentialen einzelner in spezifischen technischen Anlagen materialisierter technologischer Prinzipien und Verfahren einerseits und generell in möglichst vielen Betrieben und Industriezweigen anzutreffender Anwendungs- und Rationalisierungsinteressen andererseits gegeben sein. Zum zweiten muß eine hinrei-

chende Transferfähigkeit der institutionellen Arrangements von Entwicklern und Herstellern vorherrschen, um singuläre und spezifische Innovationsanstöße in generell nutzbare technische Lösungen zu übersetzen.

(1) Kompatibilität bezeichnet zunächst das primär technische Problem, ob überhaupt spezielle technische Lösungen vorhanden sind, die in zeitlich angemessener und ökonomisch vertretbarer Weise in allgemein nutzbare Anlagen übersetzt werden können. Darüber hinaus aber müssen die hierbei wirksamen betrieblichen Rationalisierungserfordernisse und -interessen generellen Charakter haben, sollen nachhaltige ökonomische Effekte infolge des Einsatzes neuer Techniken entstehen. Generellen Charakter weisen grundsätzlich jene Rationalisierungserfordernisse auf, die in Zusammenhang mit der Veränderung sozioökonomischer Bedingungen stehen und die in einer größeren Zahl von Betrieben einzelner oder verschiedener Branchen als Probleme angesehen werden, die durch den Einsatz neuer technischer Mittel als lösbar erscheinen. Der klassische Fall genereller Rationalisierungserfordernisse ist ohne Frage der infolge des Einsatzes neuester Techniken entstehende Konkurrenzdruck besonders produktiver einzelner Betriebe, der damit Anstoß zur Genralisierung und Diffusion der bisher nur von ihnen verwendeten Techniken gibt. Typisch ist weiterhin der Wandel von Nachfragestrukturen, wie er etwa in den letzten Jahren in den Industrien der Massenproduktion die bisherigen Formen der starren Automatisierung obsolet werden ließ und auf flexible Formen der Automatisierung drängte. Eine ähnliche Wirkung können veränderte Arbeitsmarktbedingungen haben, indem etwa die Verknappung von qualifizierten Arbeitskräften neuartige Automatisierungslösungen nahelegt. Schließlich können generelle Problemlagen vom Typ des Flaschenhalseffektes auftreten, die Resultat eines bestimmten, in vielen Betrieben vorfindbaren Niveaus technischer Entwicklung sind, das im einzelnen durch einen ungleichzeitigen Entwicklungsstand einzelner Komponenten und dadurch induzierten Engpässen und Störungen in Produktionsprozessen charakterisiert ist.

Bei der Bewältigung von Rationalisierungserfordernissen durch die Einführung neuer Techniken kann es sich freilich immer nur um temporäre Lösungen handeln, sei es infolge eines raschen Wandels struktureller Bedingungen, sei es in Zusammenhang mit dem Aufkommen neuer Engpässe in Produktionsabläufen nach der Implementation neuer Systeme. Insbesondere die ständige Engpaßbeseitigung ist ein besonderes Merkmal der

Prozesse "schleichender Rationalisierung" und führt zu der immer nur inkrementellen Weiterentwicklung vorhandener Maschinen und Anlagen.

Auf die Eigentümlichkeiten von Kompatibilität zwischen verfügbaren Technologien und generellen Anwenderproblemen und damit dem Transfer neuer technischer Lösungen verweisen nicht zuletzt die Befunde über die NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik. So läßt sich insbesondere die deutsche NC-Entwicklung seit Mitte der 70er bis zum Ende der 80er Jahre als Beispiel für eine hohe Kompatibilität zwischen vorhandenen Lösungspotentialen und neu aufgekommenen Anwenderanforderungen interpretieren: Die in den 60er und frühen 70er Jahren nur für wenige Anwendungsfälle entwickelten werkstattorientierten Steuerungen erwiesen sich ab der zweiten Hälfte der 70er Jahre mit den aufkommenden und sich immer weiter verbreitenden Anwenderinteressen an flexibler Automatisierung als hoch kompatibel und diffundierten in nahezu sämtliche Bereiche der Metallverarbeitenden Industrie. Sie bildeten eine vermutlich nicht unwichtige technische Voraussetzung für Produktivitätssteigerung und weiteres Wachstum bei sich ändernden marktökonomischen Bedingungen. Das Gegenbeispiel einer mangelnden Kompatibilität ist das gescheiterte Playback-Verfahren der amerikanischen NC-Technik in den 50er Jahren. Aufgrund seines nur begrenzten Automatisierungsgrads hatten weder die Luft- und Raumfahrtindustrie noch die zivilen Massenproduzenten ein Interesse am Einsatz dieser Technik.

(2) Die zweite wichtige Voraussetzung für den Transfer spezieller Einzeltechniken hin zu allgemein nutzbaren Maschinen und Anlagen ist die Fähigkeit der Entwickler und Hersteller von Fertigungstechnik, diesen Übertragungsprozeß hinreichend flexibel und innovativ zu bewältigen. In Rosenbergs Analyse des Industrialisierungsprozesses des 19. Jahrhunderts war es vor allem der Werkzeugmaschinenbau, von dessen "Lernprozessen" und seinem "Reservoir für Fertigkeiten und technischem Wissen" es abhängig war, inwieweit dieser Prozeß in Gang gehalten werden konnte (Rosenberg 1975, S. 224). Wie indes die Befunde über die NC-Entwicklung zeigen, kommt zwar nach wie vor dem Werkzeugmaschinenbau für die Entwicklung, Herstellung und Verbreitung von Fertigungstechniken eine überaus wichtige Funktion zu. Aufgrund der fortschreitenden Verwissenschaftlichung von Technikentwicklung in Zusammenhang mit gewandelten Anforderungen der Technikanwender ist heute jedoch ein ausdifferenziertes institutionelles Arrangement von Entwicklern und Her-

stellern aus dem Wissenschaftsbereich, dem Maschinenbau und der Elektrotechnischen Industrie anzutreffen, das in seiner Gesamtheit fertigungstechnische Entwicklung vorantreibt. Damit ist der Transfer von Fertigungstechniken nicht mehr allein von der Leistungsfähigkeit eines einzelnen kollektiven Akteurs, eben des Werkzeugmaschinenbaus, abhängig, sondern von der des Arrangements sehr verschiedener Institutionen und Akteure.

Welche Faktoren die Transfer- und damit Innovationsfähigkeit solcher Arrangements bestimmen, zeigt die Analyse der verschiedenen Innovationsmuster. Die jeweilige Innovationsfähigkeit hing besonders davon ab, ob über die Beziehungen zwischen den beteiligten Akteuren jederzeit neues Wissen und Informationen generiert und verbreitet werden konnten, ob die Entwicklerkonstellationen es erlaubten, neue Akteure zu integrieren und ob die Innovationsmuster über hinreichend flexibel nutzbare und vor allem ausreichende kognitive, personelle und finanzielle Entwicklungsressourcen verfügten. Die Effizienz dieser Konstellation hing ihrerseits von der Art der Austausch- und Koordinationsmechanismen ab, die die Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Akteuren regelten. So erwies sich das deutsche Innovationsmuster mit seinen vergleichsweise kooperativen Strukturen als wesentlich flexibler und innovativer als die amerikanischen Innovationsmuster, bei denen relativ starre, von Großanwendern aus der militärischen Luft- und Raumfahrtindustrie sowie den zivilen Massenproduzenten dominierte Beziehungen zwischen Entwicklern und Anwendern vorherrschten.

Dieser Befund läßt sich mit den Ergebnissen der industrieökonomischen Netzwerkforschung verknüpfen, die sich in kritischer Weiterentwicklung der Neuen Institutionellen Ökonomie mit Fragen marktwirtschaftlicher und industrieller Ordnungsstrukturen befaßt.⁷ Danach erweist sich das Modell der Kooperation in Netzwerken als funktionsfähige Form von Austauschbeziehungen für die Bewältigung kontinuierlicher, zugleich aber von Interdependenz und Unbestimmtheit gekennzeichneten Innovationsanforderungen. Kooperation in Netzwerken ist dabei einerseits zu unterscheiden

7 Vergleiche zum folgenden vor allem Semlinger (1993) und Mahnkopf (1993), die wesentliche Aspekte dieser sozialwissenschaftlichen Forschungsrichtung in industriesoziologischer bzw. gesellschaftstheoretischer Perspektive zusammenfassen.

von punktuellen und preislich bestimmten Marktbeziehungen, andererseits von hierarchischen, vermachteten Austauschbeziehungen. Mit Kooperation werden lockere und zugleich aber auch langfristig stabile Beziehungen zwischen einer begrenzten Zahl kollektiver Akteure bezeichnet, die auf der Basis unterschiedlicher, jedoch aufeinander bezogener Interessen sowie spezialisierter und sich zugleich ergänzender Kompetenzen und Ressourcen zu einer gemeinsamen Leistung fähig sind. Die Leistungsfähigkeit von kooperativen Arrangements begründet sich darin, daß sie verschiedenartige technische Kompetenzen bündeln, über ein breites Feld von Ressourcen verfügen, einen relativ ungehinderten und raschen Zugang zu benötigten Informationen gewährleisten und insbesondere eine Abstimmung divergierender Interessen ermöglichen. Es geht dabei mithin um Interaktionsprozesse zwischen den in Netzwerken integrierten Akteuren, die politikwissenschaftlich als "Verhandlung" begriffen werden und in denen ein Korridor sich überschneidender Interessen zwischen den beteiligten Akteuren für ein gemeinsam angestrebtes Ergebnis der Zusammenarbeit ausgelotet wird (z.B. Scharpf 1988; Mayntz 1992).

Mit kooperativen Austauschbeziehungen ist freilich immer auch die Möglichkeit des Konflikts verwoben. Denn die Eigentümlichkeiten eben nicht nur stabiler, sondern auch lockerer Beziehungen implizieren Autonomie, divergierende Interessen und unabgestimmte Strategien eines Akteurs, die in Widerspruch zu den Interessen anderer Akteure des kooperativen Netzwerks treten können. Abgesehen von dem Verlassen des kooperativen Gefüges, beinhaltet dies die Möglichkeit des Versuchs einzelner Akteure, Bedingungen des Austauschs zu ihren Gunsten zu verändern und die eigenen Autonomiespielräume innerhalb des existierenden institutionellen Arrangements zu vergrößern. Kooperation umfaßt daher nicht notwendigerweise allein symmetrische Austauschbeziehungen zwischen den Beteiligten, sondern auch - wie etwa in der industriesoziologischen Debatte um Zulieferbeziehungen in der Automobilindustrie betont wird (zuletzt: Deiß, Döhl 1992) - die Möglichkeit eines ungleichen Tauschs zwischen unterschiedlich autonomen Akteuren. Die tatsächliche Funktionsfähigkeit von Innovationsmustern für den Transfer fertigungstechnischer Lösungen ist daher immer gebunden an eine prekäre und ständig erforderliche Balance zwischen Konkurrenz und Kooperation.

Dies verweist auf die Frage nach den Stabilitätsbedingungen kooperativer Austauschbeziehungen. Wie die vorliegenden Befunde über das deutsche

Innovationsmuster zeigen, spielt hierfür zunächst einmal die vermittelnde Rolle "intermediärer" Institutionen zwischen den beteiligten Akteuren eine wichtige Rolle. Dabei handelt es sich um Techniker-Communities, Verbände der verschiedensten Art und neuerdings auch um staatliche Stellen, die die Kooperation zwischen den Entwicklern der verschiedensten Provenienz und Anwenderbetrieben fördern und Konkurrenz begrenzen. Ihre Rolle ist dabei weniger die eines steuernden Akteurs oder "Transmissionszentrums" für den Transfer neuen technischen Wissens und neuer Techniken, wie es im 19. Jahrhundert des Werkzeugmaschinenbaus war (Rosenberg 1975), sondern vielmehr haben diese Instanzen eine Moderatorenrolle: Sie stoßen den Verhandlungsprozeß an, suchen Blockaden zu überwinden, setzen Schwerpunkte und beeinflussen seine Richtung.

Die Konsolidierung kooperativer Austauschbeziehungen beruht darüber hinaus jedoch auf Mechanismen, die in der Literatur als "Reziprozität" und "Vertrauen" gefaßt werden (Mahnkopf 1993). Deutlich umfassender als ökonomisch motivierte einmalige Tauschbeziehungen stellt Reziprozität danach auf eine langfristige Austauschperspektive ab, bei der sich die Leistungen der beteiligten Akteure nicht in jedem einzelnen Austauschvorgang ausgleichen müssen, sondern auf einer in die Vergangenheit zurückreichenden gemeinsamen Beziehungsgeschichte wie auch auf der Erwartung künftig gemeinsamer Vorhaben basieren. Die sozialen Voraussetzungen solchermaßen funktionierender Beziehungen verweisen auf soziale Zusammenhänge, die oft mit Kategorien wie "Gemeinschaft" oder "Clan" umschrieben werden. Damit wird auf Sozialisationsprozesse abgestellt, in denen den Akteuren Traditionen und implizite Regeln vermittelt werden, nach denen sie ihre Tauschbeziehungen ausrichten (z.B. Ouchi 1980; Deutschmann 1987). Die wichtige Rolle stabiler Ingenieur-Communities mit gemeinsamen Ausbildungsgängen und Studienorten für den Prozeß der Technikentwicklung verweist auf die Bedeutung solcher Sozialisationsprozesse und sozialer Zusammenhänge für die Funktion von Kooperation. Im übertragenen Sinn gilt dies auch für die Beziehungen zwischen Maschinenbaubetrieben und ingenieurwissenschaftlichen Instituten im deutschen Innovationsmuster, wo nicht selten spezifische Forschungs- und Entwicklungsaufträge von Unternehmen über Jahre hinweg an die gleichen Institute gegeben werden.

Dem Modell kooperativer Austauschbeziehungen in Netzwerken kommt grosso modo das deutsche Innovationsmuster relativ nahe. Es erwies seine

Leistungsfähigkeit unter den sozioökonomischen Bedingungen der 70er und 80er Jahre, vor allem auf den expandierenden Werkzeugmaschinenmarkt in Westeuropa. Mehr oder weniger friktionslos wurde die NC-Technik in die existierenden fertigungstechnischen Entwicklungspfade integriert und damit einer wachsenden Anwendernachfrage nach Lösungen flexibler Automatisierung nachgekommen. Obgleich vermutlich der Zusammenhang nur schwer zu quantifizieren wäre, war dies fraglos eine der wichtigen Voraussetzungen für den ökonomische Erfolg des westdeutschen Werkzeugmaschinenbaus in den 80er Jahren.

Unter den verschärften Krisenbedingungen seit Beginn der 90er Jahre, dem damit verbundenen beschleunigten industriellen Strukturwandel und der fortschreitenden Globalisierung der Werkzeugmaschinenmärkte besteht nun allerdings die Gefahr, daß sich die bisherigen Stärken des deutschen Innovationsmusters als nicht mehr ausreichend erweisen; es sind in Zukunft Innovationsprobleme nicht mehr auszuschließen (Kap. VII, 5.). Ein Gutteil dieser Probleme resultiert zunächst einmal aus den kooperativen Grundstrukturen dieses Musters. Der Vorteil der in diese Strukturen eingebetteten Verhandlungsprozesse, eine kontinuierliche Zusammenarbeit trotz widersprüchlicher Interessen der Beteiligten zu gewährleisten, kann sich sehr schnell als Nachteil erweisen, wenn es darum geht, einen Prozeß erforderlicher institutioneller Veränderung in Gang zu setzen. Denn der institutionelle Grundkonsens, auf dem Verhandlungsprozesse basieren, droht gegenüber Veränderungen eine hohe Trägheit zu entfalten und möglicherweise Blockaden zu entwickeln (Mayntz 1992). In diesem Sinn können sich im deutschen Innovationsmuster die relative Geschlossenheit der kooperativen Strukturen, der Konsens der sie tragenden Communities und die enge Verschränkung von Wissenschaft und Praxis in der spezifisch deutschen "Maschinenbaukultur" als Barriere gegenüber zukünftig notwendigen Entwicklungsschüben erweisen. So erscheint es fraglich, ob es gelingen wird, die institutionalisierten Barrieren zwischen Maschinenbau einerseits und neuen Wissenschaftsdisziplinen und Technologiebereichen wie Informatik, Elektronik oder Optik andererseits in der erforderlichen Schnelligkeit zu überwinden, den damit verbundenen Wandel von Personalstrukturen, ihren Leitbildern und Entwicklungszielen friktionslos zu bewältigen und dabei zugleich den unabdingbaren Praxisbezug zu erhalten oder gar zu intensivieren.

Dem kooperativen Geflecht des deutschen Innovationsmusters mit seiner hohen Marktorientierung, dem Zusammenspiel mehr oder weniger gleichberechtigter, zumeist mittelgroßer Werkzeugmaschinenbetriebe und relativ autonomer wissenschaftlicher Institute dürfte es zudem schwerfallen, die zunehmend erforderlichen langfristigen und vor allem global ausgerichteten Entwicklungs- und Absatzstrategien über die angestammten Absatzmärkte in Europa hinaus zu verfolgen. Dies erweist sich insbesondere als Problem im Vergleich zu fertigungstechnischen Innovationsbedingungen in Japan. Soweit an dieser Stelle einschätzbar, finden sich in Japan gleichfalls kooperative Strukturmuster, jedoch mit dem Unterschied, daß sie einer ausgeprägten Dominanz durch staatliche und halbstaatliche Instanzen wie dem MITI (Ministry for International Trade and Industry) und nationalen Forschungslaboratorien unterliegen und daher Entwicklungsziele vermutlich schneller gesetzt und dauerhaft verfolgt werden können. Zum anderen wird die Werkzeugmaschinenbranche von Unternehmen mit einer beträchtlichen Kapitalkraft geprägt, die in der Lage sind, längerfristige und globale Absatzstrategien zu verfolgen (z.B. Schulz 1985; Ito 1993).

Demgegenüber fehlt in der Bundesrepublik ein dominanter, die Entwicklungsprozesse bestimmender Akteur. Die Moderatorenfunktion der intermediären Institutionen, nicht zuletzt die der staatlichen Technologiepolitik, ist zwar eine wichtige Bedingung für die Funktionsfähigkeit des existierenden Netzwerks, sie ist jedoch nicht unbedingt ausreichend dafür, daß die neuen Entwicklungsanforderungen bewältigt werden. Hinzu kommt, daß den zumeist mittelgroßen Werkzeugmaschinenbetrieben in der Bundesrepublik die notwendige Kapitalkraft fehlt, um globale Entwicklungs- und Absatzstrategien zu verfolgen und die dabei unvermeidlichen "Durststrecken" zu überwinden. Offen ist deshalb, inwieweit das deutsche Innovationsmuster ohne Veränderung seiner Strukturen in Zukunft noch in der Lage sein wird, zunehmend turbulenteren Innovationsanforderungen zu bewältigen, komplexer werdende Koordinations- und Steuerungsleistungen zu erbringen und neue Entwicklungsziele zu setzen und dauerhaft durchzuhalten.

Unabdingbar erscheint daher eine Weiterentwicklung der bisherigen institutionellen Arrangements in Richtung einer intensiveren Kooperation vor allem zwischen den Werkzeugmaschinenbetrieben, um Ressourcen zu bündeln, der Überwindung bislang existierender institutioneller und diszi-

plinärer Grenzen und der Integration neuer Entwickler aus fachfremden Feldern sowie der Versuch einer gezielteren Steuerung der Innovationsprozesse als bisher. Gefragt sind hierfür vor allem die intermediären Institutionen wie Verbände und staatliche Technologiepolitik, die ihre bisherigen Funktionen ausbauen und stärker als bisher Interessen der beteiligten Akteure vereinheitlichen, Entwicklungskonzepte definieren und Entwicklungsrichtungen bestimmen müssen. Sollten diese institutionellen Veränderungen nicht gelingen, so wird die bisherige Leistungsfähigkeit des deutschen Innovationsmusters erodieren und sein Beitrag zu ökonomischem Wachstum an Bedeutung verlieren.

Literatur

- Adler, P.S.; Borys, B.: Automation and Skill - Three Generations of Research on the NC Case. In: Politics & Society, No. 3, 1989, pp. 377-402.
- AIF (Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen) (Hrsg.): Handbuch 1982, Köln 1982.
- AK (Arbeitskreis) Rationalisierung: Auswirkungen technischer Entwicklungen auf die Arbeitswelt am Beispiel numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, hektogr. Bericht, Universität Karlsruhe, Fachschaft Wirtschaftswissenschaften und Informatik, Karlsruhe 1980.
- Alich, G.: Ein digitales Positionierverfahren für Werkzeugmaschinen. In: VDI-Z, Heft 33, 1958, S. 1573-1577.
- Altmann, N.; Deiß, M.; Döhl, V.; Sauer, D.: Ein "Neuer Rationalisierungstyp" - neue Anforderungen an die Industriesoziologie. In: Soziale Welt, Heft 2/3, 37. Jg., 1986, S. 191-206.
- Altmann, N.; Sauer, D. (Hrsg.): Systemische Rationalisierung und Zulieferindustrie - Sozialwissenschaftliche Aspekte zwischenbetrieblicher Arbeitsteilung, Frankfurt/New York 1989.
- Altwater, E.; Hoffmann, J.; Semmler, W.: Vom Wirtschaftswunder zur Wirtschaftskrise - Ökonomie und Politik in der Bundesrepublik, 2 Bde., 3. Auflage, Berlin 1982.
- AM (American Machinist), verschiedene Jahrgänge.
- AMT (The Association for Manufacturing Technology - vorm. NMTBA): The Economic Handbook of the Machine Tool Industry 1992-93, McLean 1992.
- Asdonk, J.; Bredeweg, U.; Kowol, U.: Innovation als rekursiver Prozeß. In: Zeitschrift für Soziologie, Heft 4, 20. Jg., 1991, S. 290-304.
- Asdonk, J.; Münstermann, M.; Tolksdorf, G.; Weingart, P.: Einflußfaktoren und Steuerungspotentiale im Prozeß der Technikgenese - Eine Fallstudie in außerbetrieblichen FuE-Einrichtungen, vervielf. Manuskript, Bielefeld, Dezember 1988.
- Ashburn, A.: The Machine Tool Industry - The Crumbling Foundation. In: D.A. Hicks (ed.): Is New Technology Enough? - Making and Remaking U.S. Basic Industries, Washington D.C. 1988, pp. 19-85.
- Baisch, R.; Klinge, R.; Wiehn, P.: Numerische Steuerungen des Systems Sinumerik 500. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 44, Beiheft "Numerische Steuerungen", 1970, S. 3-10.
- Baran, P.A.; Sweezy, P.M.: Monopolkapital, Frankfurt 1973.
- Bechtle, G.; Lutz, B.: Die Unbestimmtheit post-tayloristischer Rationalisierungsstrategie und die ungewisse Zukunft industrieller Arbeit - Überlegungen zur Begründung eines Forschungsprogramms. In: K. Düll; B. Lutz (Hrsg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich, Frankfurt/New York 1989, S. 9-91.

- Benad-Wagenhoff, V.: Werkstattpraxis und Entwicklung spanender Werkzeugmaschinen im deutschen Maschinenbau 1870-1914, Diss., TH Darmstadt, Darmstadt 1989.
- Benz-Overhage, K.; Brumlop, E.; Freyberg, T. v.; Papadimitriou, Z.: Neue Technologien und alternative Arbeitsgestaltung - Auswirkungen des Computereinsatzes in der industriellen Produktion, Frankfurt/New York 1982.
- Berger, U.; Offe, C.: Das Rationalisierungsdilemma der Angestelltenarbeit. In: J. Kocka (Hrsg.): Angestellte im Europäischen Vergleich, Geschichte und Gesellschaft, Sonderheft 7, 1981, S. 40-58.
- Bergmann, J.: "Reelle Subsumtion" als arbeitssoziologische Kategorie. In: W. Schumm (Hrsg.): Zur Entwicklungsdynamik des modernen Kapitalismus, Frankfurt/New York 1989, S. 39-48.
- Bergmann, J.; Hirsch-Kreinsen, H.; Springer, R.; Wolf, H.: Rationalisierung, Technisierung und Kontrolle des Arbeitsprozesses - Die Einführung der CNC-Technologie in Betrieben des Maschinenbaus, Frankfurt/New York 1986.
- Bergstermann, J.; Manz, Th.(Hrsg.): Technik gestalten, Risiken beherrschen, Berlin 1992.
- Bieber, D.; Möll, G.: Technikentwicklung und Unternehmensorganisation - Zur Rationalisierung von Innovationsprozessen in der Elektroindustrie, Frankfurt/New York 1993.
- Bittorf, W.: Automation, Darmstadt 1956.
- Bluestone, B.; Jordan, P.; Sullivan, M.: Aircraft Industry Dynamics - An Analysis of Competition, Capital, and Labor, Boston 1981.
- Blum, U.: Technische und personelle Möglichkeiten und Grenzen der Werkstattprogrammierung. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 4, 1987, S. 255-258.
- BMFT (Bundesminister für Forschung und Technologie) (Hrsg.): Faktenbericht 1990 zum Bundesbericht Forschung 1988, Bonn 1990.
- BMFT (Bundesminister für Forschung und Technologie) (Hrsg.): Bundesbericht Forschung, Bonn, verschiedene Jahrgänge.
- Boese, P.; Roschmann, K.; Stöckmann, P.: Der praktische Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen im Betrieb. In: RKW (Rationalisierungskuratorium der Deutschen Wirtschaft) (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964, S. 34-41.
- Böhle, F.: Grenzen und Widersprüche der Verwissenschaftlichung von Produktionsprozessen - Zur industriesoziologischen Verortung von Erfahrungswissen. In: Th. Malsch; U. Mill (Hrsg.): ArBYTE - Modernisierung der Industriesoziologie? Berlin 1992, S. 87-132.
- Böhle, F.; Rose, H.: Technik und Erfahrung - Arbeit in hochautomatisierten Systemen, Frankfurt/New York 1992.
- Böhme, G.; van den Daele, W.; Krohn, W.: Die Finalisierung der Wissenschaft. In: Zeitschrift für Soziologie, Heft 2, 1973, S. 128-144.

- Böhme, G.; van den Daele, W.; Krohn, W.: Die Verwissenschaftlichung von Technologie. In: G. Böhme u.a. (Hrsg.): Die gesellschaftliche Orientierung des wissenschaftlichen Fortschritts, Starnberger Studien I, Frankfurt 1978, S. 341-375.
- Bornhorst, H.; Rössel, P.: Programmsteuerung mit Sinumerik 200 für Drehmaschinen. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 44, Beiheft "Numerische Steuerungen", 1970, S. 35-38.
- Boyer, R.: Technical Change and the Theory of Regulation. In: G. Dosi et al. (eds.): Technical Change and Economic Theory, London/New York 1988, pp. 67-94.
- Brandt, G.; Papadimitriou, Z.: Was trägt die industriesoziologische Forschung zur Entwicklung eines sozialwissenschaftlichen Technikbegriffs bei? In: G. Brandt: Arbeit, Technik und gesellschaftliche Entwicklung - Transformationsprozesse des modernen Kapitalismus, Aufsätze 1971-1987, Frankfurt 1990, S. 189-209 (auch in: Kolloquienreihe "Industriesoziologischer Technikbegriff", 2. Kolloquium 25./26.11.1983, Protokoll, hektogr. Bericht, Frankfurt 1983, S. 134-157).
- Branscomb, L.M.: Does America Need a Technology Policy? In: Harvard Business Review, March-April 1992, pp. 24-31.
- Braverman, H.: Die Arbeit im modernen Produktionsprozeß, 1. Auflage 1974, Frankfurt/New York 1977.
- Brödner, P.: Fabrik 2000 - Alternative Entwicklungspfade in die Zukunft der Fabrik, Berlin 1985.
- Brödner, P.: Werkstattorientierte Programmierverfahren - ein Werkzeug für Facharbeiter. In: S. Liese (Hrsg.): Werkstattorientierte Programmierverfahren (WOP), KfK-PFT 138, Karlsruhe 1989, S. 3-20.
- Brödner, P.; Hamke, F.: Automatisierung und Arbeitsplatzstrukturen. In: MittAB (Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung), Heft 8, 1969, S. 604-618.
- Brödner, P.; Krüger, D.; Senf, B.: Der programmierte Kopf - Eine Sozialgeschichte der Datenverarbeitung, Berlin 1981.
- Brödner, P.; Schultetus, W.: Erfolgsfaktoren des japanischen Werkzeugmaschinenbaus, RKW, Eschborn 1992.
- Brosheer, B.C.: The Army Rediscovered NC. In: AM (American Machinist), No. 7, Vol. 110, 1966, pp. 65-69.
- Broska, M.; Lock, P.; Wulf, H.: Rüstungsproduktion in Westeuropa, Forschungsberichte aus dem Institut für Friedensforschung, Heft 15, hektogr., Hamburg 1979.
- Brown, W.H.: Innovation in the Machine Tool Industry. In: Quarterly Journal of Economics, No. 3, Vol. LXXI, 1957, pp. 406-425.
- Brzoska, M.: Die bundesdeutsche Rüstungsindustrie. In: M. Brzoska u.a. (Hrsg.): Das Geschäft mit dem Tod, Frankfurt 1982, S. 9-52.
- Brzoska, M.: Rüstungsproduktion in der Bundesrepublik. In: WSI-Mitteilungen, Heft 5, 1984, S. 277-284.

- Busch, D.W.; Hommerich, Chr.; Krause, D.; Mahlow, M.; Müller, W.; Zech, R.: Analyse der Tätigkeitsfelder und beruflichen Qualifikationen von Wirtschafts-, Sozial-, Ingenieur- und Naturwissenschaftlern, Bd.1, Bestandsaufnahme und Analyse der empirischen Untersuchungen, vervielf. Manuskript, Bremen, Mai 1979.
- Childs, J.J.: Principles of Numerical Control, New York 1965 (2. Auflage 1969).
- Childs, J.J.: Low-cost Numerical Control. In: Machinery, January 1966, pp. 97-113.
- Clausnitzer, R.: Der Einsatz von NC-Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart 1974.
- Clever, H.: Auf dem absteigenden Ast? In: Technische Rundschau, Heft 8, 1992, S. 50-54.
- Cohen, S.S.; Zysman, J.: Manufacturing Matters, New York 1987.
- Collis, D.J.: The Machine Tool Industry and Industrial Policy, 1955-82. In: M.A. Spence; H.A. Hazzard (eds.): International Competitiveness, Cambridge/Mass. 1988, pp. 75-114.
- CMT (Committee on the Machine Tool Industry et al.): The U.S. Machine Tool Industry and the Defense Industrial Base, Washington D.C. 1983.
- Cook, F.J.: The Warfare State, New York 1962.
- Coombs, W.: Die Verbreitung von Mechanisierungstechniken und Theorien der langen Wellen. In: Prokla, Heft 57, 1984, S. 79-98.
- Coombs, R.; Saviotti, P.; Walsh, V.: Economics and Technological Change, London 1987.
- Corbett, M.: Prospective Work Design of a Human-centred CNC Lathe. In: Behaviour and Information Technology, No. 3, Vol. 4, 1985, pp. 201-214.
- Dean, J.W.; Susman, G.I.: Organizing for Manufacturable Design. In: Harvard Business Review, January-February 1989, pp. 28-36.
- Deiß, M.; Döhl, V. (Hrsg.): Vernetzte Produktion - Automobilzulieferer zwischen Kontrolle und Autonomie, Frankfurt/New York 1992.
- Deiß, M.; Döhl, V.; Sauer, D., unter Mitarbeit von Altmann, N.: Technikherstellung und Technikanwendung im Werkzeugmaschinenbau - Automatisierte Werkstückhandhabung und ihre Folgen für die Arbeit, Frankfurt/New York 1990.
- Deiß, M.; Hirsch-Kreinsen, H.: Markt und Produktionstechnik - Zur Genese von CIM-Systemen. In: J. Bergstermann; Th. Manz (Hrsg.): Technik gestalten, Risiken beherrschen, Berlin 1992, S. 139-158.
- Der Spiegel: Irgendetwas ist schiefgelaufen - Spiegel-Report über den Niedergang der Vereinigten Staaten, Heft 43/44/45, Hamburg 1990 (o.V.).
- Dertouzos, M.L.; Lester, R.K.; Solow, R.M.: Made in America - Regaining the Productive Edge, Cambridge/Mass./London 1989.
- Deutschmann, Chr.: Der "Betriebsclan". In: Soziale Welt, Heft 2, 38. Jg., 1987, S. 133-147.

- DeVries, M.A. (ed.): NC: 1971 - The Opening Door to Productivity and Profit, Numerical Control Society, Princeton/New York 1971.
- Dick, R.: Wettbewerbsfähigkeit und Spezialisierung des westdeutschen Maschinenbaus. In: Die Weltwirtschaft, Heft 1, 1975, Kiel, S. 159-177.
- Dierkes, M.; Hoffmann, U.; Marz, L.: Leitbild und Technik - Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen, Berlin 1992.
- DiFilippo, A.: Military Spending and Industrial Decline - A Study of the American Machine Tool Industry, New York et al. 1986.
- DIW (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung): Produktionsvolumen und -potential, Produktionsfaktoren der Industrie im Gebiet der BRD, Statistische Kennziffern, 13./16./22. Folge, Berlin 1973/1976/1982.
- Döhl, V.: Die Rolle von Technikern im Prozeß systemischer Rationalisierung. In: B. Lutz (Hrsg.): Technik in Alltag und Arbeit, Berlin 1989, S. 147-166.
- Dormehl, E.: Programmsteuerungen an Drehmaschinen. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 2, 1965, S. 91-98.
- Dosi, G.: Technological Paradigms and Technological Trajectories. In: Research Policy, No. 11, 1982, pp. 147-162.
- Dosi, G.: Technological Paradigms and Technological Trajectories. In: Chr. Freeman (ed.): Long Waves in the World Economy, London/Dover 1984, pp. 78-101.
- Dosi, G.; Freeman, Chr.; Nelson, R.; Silverberg, G.; Soete, L. (eds.): Technical Change and Economic Theory, London/New York 1988.
- Drexel, I.; Méhaut, Ph.: Der Weg zum Techniker: Aufstieg oder Seiteneinstieg? - Unterschiedliches und Gemeinsames in den Entwicklungen von Bildungssystem und betrieblicher Personalpolitik in Deutschland und Frankreich. In: K. Düll; B. Lutz (Hrsg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich, Frankfurt/New York 1989, S. 287-333.
- Duelen, G.: Steuerung von Werkzeugmaschinen mit Prozeßrechnern, Diss., TU Berlin, Berlin 1973.
- Dunkhorst, St.: Am Werkstück programmieren. In: Technische Rundschau, Heft 16, 1989, S. 102-107.
- Dyke, R.M.: Die numerische Steuerung in den USA - heute. In: technica, Nr. 11, 1970, S. 907-920.
- Emspak, F.: Skills-Based Automation: Can it Succeed in America? - A Case Study. Paper prepared for the 11th IFAC World Congress - Automatic Control in the Service of Mankind, Vol. 12, Tallinn/Estonia/UdSSR, August 1990, pp. 224-228.
- Engelskirchen, H.W.: Numerical Control in Europe. In: M.A. DeVries (ed.): NC: 1971 - The Opening Door to Productivity and Profit, Numerical Control Society, Princeton/New York 1971, pp. 22-28.
- Erd, R.: Amerikanische Gewerkschaften - Strukturprobleme am Beispiel der Teamsters und der Automobilarbeiter, Frankfurt/New York 1989.

- Eversheim, W. u.a.: Stand und Entwicklungstendenzen der NC-Technik. In: wt (Werkstattstechnik), Heft 5, 1975, S. 218-287.
- Faulkner, H.U.: Geschichte der amerikanischen Wirtschaft, Düsseldorf 1957.
- Fischer, B.: Macher oder Opfer des technischen Fortschritts? - Ingenieure in den USA. In: W. Rammert u.a. (Hrsg.): Technik und Gesellschaft, Jahrbuch 2, Frankfurt/New York 1983, S. 92-108.
- Freeman, C.: Introduction. In: G. Dosi et al. (eds.): Technical Change and Economic Theory, London/New York 1988, pp. 1-8.
- Freeman, C.; Clarke, J.; Soete, L.: Unemployment and Technological Innovation - A Study of Long Waves and Economic Development, London/New York 1982.
- Freyberg, Th. v.: Industrielle Rationalisierung in der Weimarer Republik - Untersucht an Beispielen aus dem Maschinenbau und der Elektroindustrie, Frankfurt/New York 1989.
- Frick, K.D.: Entwicklung des deutschen Drehmaschinenbaus. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 5, 124. Jg., 1991, S. 343-347.
- Gebhardt, G.; Hatzold, O.: Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen. In: L. Nabseth; G.F. Ray (Hrsg.): Neue Technologien in der Industrie, Berlin/München 1978, S. 26-68.
- Geer, T. u.a.: Sektorale Entwicklungstendenzen im Maschinenbau. In: RWI (Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung) (Hrsg.): Wachstum und Struktur der deutschen Wirtschaft in den 80er Jahren, Essen 1980.
- Gehrels, J.; Waibel, G.: Anwendungsbereiche frei programmierbarer numerischer Steuerungen. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 47, Beiheft "Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine", 1973, S. 61-65.
- Geiger, M.; Bretz, M.; Schwieren, W.: CNC für die Werkstattprogrammierung. In: wt, 1978, S. 603-608.
- Gerybadze, A.; Arthur D. Little International: Raumfahrt und Verteidigung als Industriepolitik? Frankfurt/New York 1988.
- Geyer, W.: Der gegenwärtige Stand der Datenverarbeitung bei numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen in Europa. In: Regelungstechnik, Heft 16, 1968, S. 1-9.
- Geyer, W.; Waller, S.: Sinumerik B, ein Bahnsteuerungssystem für Werkzeugmaschinen. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 4, 1966, S. 55-60.
- Glasstätter, W.: Die wirtschaftliche Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum 1950 bis 1975, Berlin/Heidelberg/New York 1977.
- Goldner, H.H.: Programmierplätze, Programmiersysteme und Programmierverfahren. In: ZWF (Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung und Automatisierung), Heft 4, 75. Jg., S. 172-182.
- Goldschlager, L.; Lister, A.: Informatik, München/Wien 1984.
- Götz, E.: Die numerische Steuerung in den 70er Jahren. In: ZWF, Heft 8, 65. Jg., 1970, S. 405-410.

- Gray, J.A.: Situation des Werkzeugmaschinenbaus in den USA. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 10, 120. Jg., 1987, S. 754-756.
- Grüner, G.: Berufsausbildung erst nach dem 18. Lebensjahr - Das amerikanische Community College. In: Die berufsbildende Schule, Heft 4, 1985, S. 235-247.
- Grupe, U.: Programmiersprachen für die numerische Werkzeugmaschinensteuerung, Berlin/New York 1974.
- Grupe, U.; Hamacher, B.: Werkstattorientierte Auslegung und Entwicklung von CAD-CAM-Systemen. In: ISF München (Hrsg.): Arbeitsorganisation bei rechnerintegrierter Produktion, Karlsruhe 1988, S. 43-69.
- Gurtner, D.; Müller, P.: Besonderheiten der Sinumerik 540 und 550. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 47, Beiheft "Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine", 1973, S. 40-45.
- Habig, G.: Struktur- und Wettbewerbsverschiebungen auf den internationalen Werkzeugmaschinen-Märkten. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 1, 121. Jg., 1988, S. 6-11.
- Hack, L.: Vor Vollendung der Tatsachen - Die Rolle von Wissenschaft und Technologie in der dritten Phase der industriellen Revolution, Frankfurt 1988.
- Hack, L.; Fleischmann, G.; Schmid, A.; Bender, G.; Breßler, R.; Heimer, Th.: Technologieentwicklung als Institutionalisierungsprozeß - Stand der Forschung, Lage der Dinge, gemeinsame Überlegungen. Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt, Interdisziplinäre Technologieforschung, Arbeitspapier 1, hektogr. Manuskript, Frankfurt 1991.
- Hack, L.; Hack, I.: Die Wirklichkeit, die Wissen schafft - Zum wechselseitigen Begründungsverhältnis von "Verwissenschaftlichung der Industrie und Industrialisierung der Wissenschaft", Frankfurt/New York 1985.
- Halfmann, J.: Die Entstehung der Mikroelektronik, Frankfurt/New York 1984.
- Hammer, H.: Technische, betriebliche und wirtschaftliche Aspekte der Werkstattprogrammierung. In: VDI-Z, Heft 20, 1979, S. 999-1007.
- Handelsblatt, Düsseldorf/Frankfurt, verschiedene Jahrgänge.
- Harrington, J.: Computer Integrated Manufacturing, New York 1973.
- Harrington, J.: Understanding the Manufacturing Process - Key to Successful CAD/CAM Implementation, New York/Basel 1984.
- Harvey, N.: Automation and Restructuring - How Industrial Relations Affects Change in the Wisconsin Metal Working Industry. Paper to be published as Part of Proceedings of the IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill, Madison/WI, September 1992.
- Häuser, K.: Erste Anwendungen numerischer Steuerungen. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 11, 117. Jg., 1984, S. 719-721.
- Häuser, K.: Computerhistorie der Fabrik mit Zukunft. In: VDI-Nachrichten, Nr. 41, 1987, S. 32.
- Häusler, J.: Zur Gegenwart der Fabrik der Zukunft - Forschungsaktivitäten im Maschinenbau, MPIFG Discussion Paper 90/1, Köln, März 1990.

- Hayes, R.H.; Abernathy, W.J.: Managing Our Way to Economic Decline. In: Harvard Business Review, July-August 1980, pp. 67-77.
- Heidenreich, M.; Schmidt, G. (Hrsg.): International vergleichende Organisationsforschung, Opladen 1991.
- Heilig, L.; Willert, R.: NC- und CNC-Steuerungen. In: ZWF, Heft 6, 79. Jg., 1984, S. 276-286.
- Heller, B.: Von der Bohr- und Fräsmaschine zum Bearbeitungszentrum. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 5, 124. Jg., 1991, S. 349-353.
- Herold, H.; Maßberg, W.; Stute, G.: Die numerische Steuerung in der Fertigungstechnik, Düsseldorf 1971.
- Herrigel, G.: Industrial Order in the Machine Tool Industry - A Comparison of the United States and Germany. Draft Prepared for the Conference Volume: Comparing Capitalist Economies: Variation in the Governance of Sectors, mimeographed, Chicago 1988.
- Herrigel, G.: Industrial Organization and the Politics of Industry - Centralized and Decentralized Production in Germany, Diss., MIT, Cambridge/Mass. 1990.
- Hirsch, J.: Wissenschaftlich-technischer Fortschritt und politisches System, Frankfurt 1970.
- Hirsch-Kreinsen, H.: Soziale Bedingungen der NC-Entwicklung - in den USA und der Bundesrepublik Deutschland. In: ZWF, Heft 8, 83. Jg., 1988, S. 422-425.
- Hirsch-Kreinsen, H.: Entwicklung einer Basistechnik - NC-Steuerungen von Werkzeugmaschinen in den USA und der Bundesrepublik. In: K. Düll; B. Lutz (Hrsg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich, Frankfurt/New York 1989, S. 161-211.
- Hirsch-Kreinsen, H.: On the History of NC-Technology - Different Paths of Development. In: N. Altmann et al. (eds.): Technology and Work in German Industry, London/New York 1992, pp. 63-76.
- Hirsch-Kreinsen, H.; Schultz-Wild, R.; Köhler, Ch.; Behr, M. v.: Einstieg in die rechnerintegrierte Produktion - Alternative Entwicklungspfade der Industriearbeit im Maschinenbau, Frankfurt/New York 1990.
- Hoffmann, Th.; Martin, H.: CNC-Steuerungen im Vergleich - Eigenschaften von CNC-Steuerungen zur Dreh- und Fräsbearbeitung. In: H. Rose (Hrsg.): Programmieren in der Werkstatt, Frankfurt/New York 1990, S. 97-153.
- Holland, M.: When the Machine Stopped, Cambridge/Mass. 1989.
- Hollingsworth, J.R.: Die Logik der Koordination des verarbeitenden Gewerbes in Amerika. In: KZfSS, Heft 3, 1991, S. 18-43.
- Hornschild, K.; Neckermann, G., unter Mitarbeit von Meyer-Krahmer, F.: Die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie - Stand und Perspektiven, Frankfurt/New York 1988.
- Hough, G.W.: Technology Diffusion - Federal Programms & Procedures, Mt. Airy/Maryland 1975.

- Hounshell, D.A.: From the American System to Mass Production, 1800-1932, 3. Auflage, Baltimore/London 1991.
- Howe, R.E.: Introduction to Numerical Control in Manufacturing, ASTME, Dearborn 1969.
- Hubka, V.: Lagebericht Konstruktionswissenschaft. In: V. Hubka (Hrsg.): Proceedings of ICED '91, Vol. 2, Zürich 1991, S. 761-768.
- Hübner, K.: Theorie der Regulation, Berlin 1989.
- Hughes, Th.P.: Die Erfindung Amerikas - Der technologische Aufstieg der USA seit 1870, München 1991.
- Hurtienne, Th.: Entwicklungen und Verwicklungen - Methodische und entwicklungstheoretische Probleme des Regulationsansatzes. In: B. Mahnkopf (Hrsg.): Der gewendete Kapitalismus, Münster 1988, S. 182-224.
- IEN (Industrial Equipment News): Automation and Numerical Control, Special Issue, New York, July 1983.
- IG Metall (Wirtschaftsabteilung: Spezial) (Hrsg.): Fertigungstiefe im Maschinenbau, hektogr. Bericht, Frankfurt, März 1991.
- Ito, Y.: Research and Development Activities to Enhance Market Competitiveness of Products in Japanese Machine Tool Industry, mimeographed, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 1993.
- Joerges, B.: Large Technical Systems - Concepts and Issues. In: R. Mayntz; Th.P. Hughes (eds.): The Development of Large Technical Systems, Frankfurt/New York 1988, pp. 9-36.
- Jokisch, R. (Hrsg.): Techniksoziologie, Frankfurt 1982.
- Junne, G.: Das amerikanische Rüstungsprogramm - Ein Substitut für Industriepolitik. In: Leviathan, Heft 1, 1985, S. 23-37.
- Kalkowski, P.; Manske, F.: Innovation im Maschinenbau. In: SOFI-Mitteilungen, Nr. 20, Göttingen 1993, S. 62-85.
- Kazis, R. et al.: Education and Training in the United States. In: The MIT Commission on Industrial Productivity (ed.): Working Papers of the MIT Commission on Industrial Productivity, Vol. 2, Cambridge/Mass./London 1989.
- Keck, O.: Der schnelle Brüter - Eine Fallstudie über Entscheidungsprozesse in der Großtechnik, Frankfurt/New York 1984.
- Keene, P.V.: Shop Language NC. In: M.A. DeVries (ed.): NC: 1971 - The Opening Door to Productivity and Profit, Numerical Control Society, Princeton/New York 1971, pp. 249-277.
- Kelley, M.E.: Alternative Forms of Work Organization under Programmable Automation. In: St. Wood (ed.): The Transformation of Work? London et al. 1989, pp. 235-246.
- Kelley, M.E.; Brooks, H.: The State of Computerized Automation in U.S. Manufacturing, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, mimeographed, Cambridge/Mass., October 1988.

- Kelley, M.E.; Brooks, H.: From Break-Through to Follow-Through. In: Issues in Science and Technology, Vol. 5, 1988/89, 1989, pp. 42-47.
- Kern, H.: Über die Gefahr, das Allgemeine im Besonderen zu sehr zu verallgemeinern. In: Soziale Welt, Heft 1/2, 1989, S. 259-268.
- Kief, H.B.: NC-Handbuch 1986, Michelstadt 1986.
- Kief, H.B.: Mehr Vorteile durch Werkstattprogrammierung. In: Technische Rundschau, Heft 38, 1988, S. 36-39.
- Kief, H.B.: Von der NC zur CNC - die Entwicklung der numerischen Steuerungen. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 5, 124 Jg., 1991, S. 385-390
- Kleinknecht, A.: Innovationsschübe und lange Wellen - Was bringen "neoschumpeterianische" Kriseninterpretationen? In: Prokla, Heft 57, 1984, S. 55-78.
- Knie, A.: Diesel - Karriere einer Technik, Berlin 1991.
- Knorr-Cetina, K.: Die Fabrikation von Erkenntnis, revidierte und erweiterte Fassung, Frankfurt 1991.
- Köhler, Ch.: Betrieblicher Arbeitsmarkt und Gewerkschaftspolitik - Innerbetriebliche Mobilität und Arbeitsplatzrechte in der amerikanischen Automobilindustrie, Frankfurt/New York 1981.
- Köhler, Ch.; Grüner, H.: Stamm- und Randbelegschaften - Ein überlebtes Konzept? In: Ch. Köhler; P. Preisendörfer (Hrsg.): Betrieblicher Arbeitsmarkt im Umbruch, Frankfurt/New York 1989, S. 175-206.
- Kohring, G.: Automatisches Positionierverfahren einer Koordinatenbohrmaschine. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 2, 95. Jg., 1962, S. 87-91.
- Kohring, G.: Grundlagen und Praxis numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, München 1966.
- König, W.: Wissenschaft und Praxis - Schlüsselkategorien für die Entwicklung des deutschen technischen Ausbildungssystems. In: Mitteilungen der TU Braunschweig, Heft 20, 1985, S. 30-36.
- König, W.; Gorges, I.; Niemitz, H.-U.; Oelsner, R.: Geschichte von Konstruktionstheorie und Konstruktionspraxis im Maschinenbau vom 19. Jahrhundert bis zur Einführung von CAD-Systemen heute. In: Forschergruppe Konstruktionshandeln (Hrsg.): Forschungsbericht 1987-1988, TU Berlin, hektogr. Bericht, Berlin 1988.
- König, W.; Gorges, I.; Niemitz, H.-U.; Oelsner, R.: Konstruktionsgeschichte in Frankreich und den USA vom 19. Jahrhundert bis zur Einführung von CAD-Systemen heute. In: Forschergruppe Konstruktionshandeln (Hrsg.): Forschungsbericht 1989-1990, TU Berlin, hektogr. Bericht, Berlin 1990.
- Krauch, H.; Kunz, W.; Rittel, H. (Hrsg.): Forschungsplanung - Eine Studie über Ziele und Strukturen amerikanischer Forschungsinstitute, München/Wien 1966.
- Kreher, P.-J.: Viele Unternehmen bekommen die Kosten nicht mehr in den Griff. In: Handelsblatt, Düsseldorf/Frankfurt, 2.11.1992, S. 28.

- Kreibich, R.: Die Wissenschaftsgesellschaft - Von Galilei zur High-Tech-Revolution, Frankfurt 1986.
- Krohn, W.; Rammert, W.: Technologieentwicklung - Autonomer Prozeß und industrielle Strategie. In: B. Lutz (Hrsg.): Soziologie und gesellschaftliche Entwicklung, Frankfurt/New York 1985, S. 411-433.
- Kronenberg, M.: Fortschritte der Automatisierung in den USA. In: wt, Heft 3, 56. Jg., 1966, S. 105-118.
- Kunerth, W.; Lederer, K.G.; Lienert, J.: Rechnereinsatz in der Produktion, Berlin/Köln 1976.
- Landes, D.S.: Der entfesselte Prometheus, Köln 1973.
- LeBold, W.K.; Perrucci, R.; Howland, W.: The Engineer in Industry and Government. In: Journal of Engineering Education, Vol. 56, 1966, pp. 237-273.
- Liese, S. (Hrsg.): Werkstattorientierte Programmierverfahren (WOP), KfK-PFT 138, Karlsruhe, Dezember 1989.
- Lutz, B.: Der kurze Traum immerwährender Prosperität - Eine Neuinterpretation der industriell-kapitalistischen Entwicklung im Europa des 20. Jahrhunderts, Frankfurt/New York 1984 (2. Auflage 1989).
- Lutz, B.: Das Ende des Technikdeterminismus und die Folgen - Soziologische Technikforschung vor neuen Aufgaben und neuen Problemen. In: B. Lutz (Hrsg.): Technik und sozialer Wandel, Frankfurt/New York 1987, S. 34-52.
- Lutz, B.: Technikforschung und Technologiepolitik: Förderstrategische Konsequenzen eines wissenschaftlichen Paradigmenwandels. In: WSI-Mitteilungen, Heft 10, 43. Jg., 1990, S. 614-622.
- Lutz, B.: Die Grenzen des "effet sociétal" und die Notwendigkeit einer historischen Perspektive - Einige Bemerkungen zum vernünftigen Gebrauch internationaler Vergleiche. In: M. Heidenreich; G. Schmidt (Hrsg.): International vergleichende Organisationsforschung, Opladen 1991, S. 91-105.
- Lutz, B.; Kammerer, G.: Das Ende des graduerten Ingenieurs? - Eine empirische Analyse unerwarteter Nebenfolgen der Bildungsexpansion, Frankfurt/Köln 1975.
- Lutz, B.; Veltz, P.: Maschinenbauer versus Informatiker - Gesellschaftliche Einflüsse auf die fertigungstechnische Entwicklung in Deutschland und Frankreich. In: K. Düll; B. Lutz (Hrsg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich, Frankfurt/New York 1989, S. 213-285.
- MacKenzie, D.A.; Wajcman, J. (eds.): The Social Shaping of Technology, Philadelphia 1985.
- Mahnkopf, B. (Hrsg.): Der gewendete Kapitalismus, Münster 1988.
- Mahnkopf, B.: Markt, Hierarchie und soziale Beziehungen - Zur Bedeutung reziproker Beziehungsnetzwerke in modernen Marktgesellschaften. In: N. Beckenbach u.a. (Hrsg.): Umbrüche der gesellschaftlichen Arbeit, Soziale Welt, Sonderband, Opladen 1993 (im Erscheinen).
- Mandel, E.: Die EWG und die Konkurrenz Europa - Amerika, 6. Auflage, Köln 1972.

- Mandel, E.: Die langen Wellen des Kapitalismus, Frankfurt 1983.
- Manske, F.: Kontrolle, Rationalisierung und Arbeit - Kontinuität durch Wandel. Die Ersetzbarkeit des Taylorismus durch andere Kontrolltechniken, Berlin 1991.
- Manufacturing Engineering, verschiedene Jahrgänge.
- March, A. et al.: The US Machine Tool Industry and its Foreign Competitors. In: The MIT Commission on Industrial Productivity (ed.): Working Papers of the MIT Commission on Industrial Productivity, Vol. 2, Cambridge/Mass./London 1989.
- Mattick, P.: Marx und Keynes, Frankfurt/Köln 1971.
- Maurice, M.; Sorge, A.: Industrielle Entwicklung und Innovationsfähigkeit der Werkzeugmaschinenhersteller in Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland. Discussion Papers No. FS I 90-11, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1990.
- Mayntz, R.: Modernisierung und die Logik von interorganisatorischen Netzwerken. In: Journal für Sozialforschung, Heft 1, 32. Jg., 1992, S. 19-31.
- Mayntz, R.; Hughes, Th.P. (eds.): The Development of Large Technical Systems, Frankfurt/New York 1988.
- Meil, P.: Stranger in Paradise - An American's Perspective on German Industrial Sociology. In: N. Altmann et al. (eds.): Technology and Work in German Industry, London/New York 1992, pp. 12-25.
- Melman, S.: Ökonomische Alternativen zur Rüstungsprosperität. In: Blätter für deutsche und internationale Politik, Heft 2, 1964, S. 133-152.
- Melman, S.: Pentagon Capitalism, New York et al. 1970.
- Melman, S.: The Permanent War Economy, New York 1974.
- Melman, S.: How the Yankees Lost their Know-how. In: MIT Technology Report, October 1983, pp. 56-64.
- Mensch, G.: Das technologische Patt, Frankfurt 1975.
- Mertins, K.: Entwicklungsstand flexibler Fertigungssysteme in den USA. In: ZWF, Heft 2, 76. Jg., 1981, S. 81-85.
- Mickler, O.: Facharbeit im Wandel - Rationalisierung im industriellen Produktionsprozeß, Frankfurt/New York 1981.
- Mickler, O.; Mohr, W.; Kadritzke, U., unter Mitarbeit von Baethge, M.; Neumann, U.: Produktion und Qualifikation, zwei Bände, hektogr. Bericht, Göttingen 1977.
- Milberg, J.: Entwicklungsstufen flexibel automatisierter Produktionssysteme. In: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München (Hrsg.): Kolloquium Automatische Produktionssysteme, Tagungsband, hektogr. Bericht, München 1985.
- Mitthof, F.: Numerik 1965 - Übersicht der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen der Welt. In: TZ für praktische Metallbearbeitung, Heft 8, 59. Jg., 1965, S. 475-499.

- Moldaschl, M.: Widersprüchliche Arbeitsanforderungen - Psychische Belastung und doppelte Realität in der Produktion. In: Sonderforschungsbereich 333 der Universität München (Hrsg.): Mitteilungen 3, München 1991, S. 15-50.
- Moll, H.H.: Zeitgerechte Arbeitsgestaltung. In: VDI-Z, Heft 10, 1979, S. 459-468.
- Moll, H.H.: Distanz zum Zentralismus. In: Wirtschaft und Produktivität, Heft 4, 1984, S. 4.
- Mommertz, K.H.: Bohren, Drehen und Fräsen - Geschichte der Werkzeugmaschinen, Reinbek 1981.
- Moritz, E.F.: Der Hebel des Todes - Wie LBO und andere amerikanische Geschäftspraktiken Werkzeugmaschinenbetriebe zu Grunde richten, hektogr. Bericht, München 1992.
- Moritz, E.F.: Culture of Manufacturing - A Case Study. In: I. Yoshimi (ed.): Advanced Manufacturing Series - Human Intelligence - Based Manufacturing, London 1993.
- Mulkens, H.: Marktmacht - Die Konzentration auf dem Markt für CNC-Steuerungen. In: Moderne Fertigung, Heft 9, 1987, S. 102-111.
- Nabseth, L.; Ray, G.F.: Neue Technologien in der Industrie, Berlin 1978.
- NC-Fertigung, verschiedene Jahrgänge.
- Nelson, R.R.: Institutions Supporting Technical Change in the United States. In: G. Dosi et al. (eds.): Technical Change and Economic Theory, London/New York 1988, pp. 312-329.
- Nelson, R.R.; Winter, S.G.: In Search of Useful Theory of Innovation. In: Research Policy, No. 6, 1977, pp. 36-76.
- New York Times, June 11, 1991.
- NMTBA (The Association for Manufacturing Technology): The Economic Handbook of the Machine Tool Industry, McLean/Va., verschiedene Jahrgänge.
- Noble, D.F.: America by Design, New York 1977.
- Noble, D.F.: Maschinen gegen Menschen - Die Entwicklung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, Stuttgart 1979.
- Noble, D.F.: Social Choice in Machine Design - The Case of Automatically Controlled Machine Tools. In: A. Zimbalist (ed.): Case Studies on the Labor Process, New York/London 1979a.
- Noble, D.F.: Forces of Production - A Social History of Industrial Automation, New York 1984.
- Noble, D.F.: Die Entwicklung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen. In: D.F. Noble (Hrsg.): Maschinenstürmer, Berlin 1986, S. 98-136.
- Nuber, Ch.; Schultz-Wild, R.: Facharbeitereinsatz und Verbreitung von Werkstattprogrammierung - Neue Durchsetzungschancen eines viel diskutierten Konzepts? In: H. Rose (Hrsg.): Programmieren in der Werkstatt, Frankfurt/New York 1990, S. 155-183.

- Nullmeier, E.: DIN-Satz orientierte CNC-Programmierung. In: Humane Produktion, Heft 4, 1987, S. 32-37.
- OECD (ed.): OECD Science and Technology Indicators, No. 2, R&D, Invention and Competitiveness, Paris 1986.
- OECD (ed.): OECD Science and Technology Indicators, No. 3, Paris 1989.
- Olesten, N.O.: Numerical Control, New York et al. 1970.
- Ong, P.: NC Machine Tools, mimeographed, o.O. 1983.
- Opitz, H.; Uhrmeister, H.; Jüskel, K.: Aufbau und Wirkungsweise einer Magnetbandsteuerung, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Köln/Opladen 1958.
- OTA (United States Congress, Office of Technology Assessment): Making Things Better - Competing in Manufacturing, OTA.ITE-443, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., February 1990.
- Ouchi, W.G.: Markets, Bureaucracies and Clans. In: Administrative Science Quarterly, Vol. 25, 1980, pp. 129-141.
- Parkinson, St.T.: New Product Development in Engineering - A Comparison of the British and West German Machine Tool Industries, Cambridge et al. 1984.
- Paulinyi, A.: Industrielle Revolution - Vom Ursprung der modernen Technik, Reinbek 1989.
- Paulinyi, A.: Die Entwicklung der NC-Maschinen und das Liegenlassen der Record-Playback-Steuerungen im Maschinenbau der USA. In: ZATU Material (Hrsg.): Technikgeschichte und Gestaltungsmöglichkeiten, Kolloquium Nr. 6, Nürnberg 1990, S. 43-58.
- Perucci, R.: Engineering - Professional Servant of Power. In: American Behavioral Scientist, No. 14, 1971, pp. 492-506.
- PFT (Projektträgerschaft Fertigungstechnik): 20 Jahre Projektträgerschaft, PDV, CAD, PFT, vervielf. Manuskript, Karlsruhe, Oktober 1991.
- Pinch, T.J.; Bijker, W.E.: The Social Construction of Facts and Artefacts - Or how the Sociology of Science and the Sociology of Technology Might Benefit Each Other. In: Social Studies of Science, No. 3, 1984, pp. 399-441.
- Piore, M.J.; Sabel, Ch.F.: Das Ende der Massenproduktion - Studie über die Requalifizierung der Arbeit und die Rückkehr der Ökonomie in die Gesellschaft, Berlin 1985.
- Pirker, Th.; Schultz-Wild, R.; Weltz, F. u.a.: Automation und Rationalisierung - Die Einführung der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik, hektogr. Bericht, München 1970.
- Politsch, H.W.: Über die Anwendung einer numerischen Zählersteuerung für einen neuzeitlichen Revolverdrehautomaten, Diss., TH Darmstadt, Darmstadt 1962.
- Politsch, H.W.: Die Programmierung von Werkzeugmaschinen mit numerischer Dateneingabe. In: RKW (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964, S. 28-33.

- Politsch, H.W.: Die Zukunft liegt im Kleinbetrieb. In: Technische Rundschau, Heft 6, 1991, S. 16-23.
- Popken, W.: Stand der Steuerungstechnik von Werkzeugmaschinen in den USA. In: ZWF, Heft 1, 74. Jg., 1979, S. 19-23.
- Porter, M.E.: Nationale Wettbewerbsvorteile, München 1991.
- Radkau, J.: Technik in Deutschland - Vom 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart, Frankfurt 1989.
- Rammert, W.: Soziale Dynamik der technischen Entwicklung, Opladen 1983.
- Rammert, W.: Entstehung und Entwicklung der Technik - Der Stand der Forschung zur Technikgenese in Deutschland. Discussion Papers No. FS II 91-105, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1991.
- Rauner, F.; Ruth, K.: Industriekulturelle Determinanten des CNC-Werkzeugmaschinenbaus im Vergleich Bundesrepublik Deutschland - USA. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 11, 121. Jg., 1988, S. 950-952.
- Reintjes, J.F.: Numerical Control - Making a New Technology, New York/Oxford 1991.
- Rempp, H.; Boffo, M.; Lay, G.: Wirtschaftliche und soziale Auswirkungen des CNC-Werkzeugmaschineneinsatzes, RKW, Eschborn 1981.
- Resource Management Corporation (ed.): The Defense Dependency of the Metalworking Machinery and Equipment Industry and Disarmament Implications, ACDA/E-130. Paper prepared for the U.S. Arms Control and Disarmament Agency, Washington D.C., May 1969.
- Richardson, Ch.; Copeland, L.; Wheeler, B.: Obstacles to Shop-Floor Programming in the United States. Paper prepared for the 11th IFAC World Congress - Automatic Control in the Service of Mankind, Vol. 12, Tallinn/Estonia/UdSSR, August 1990, pp. 234-238.
- RKW (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964 (Sonderabdruck der in der Zeitschrift Werkstattstechnik 1964 erschienenen Einzelberichte einer RKW-Studienreise nach USA).
- Rödel, U.: Forschungsprioritäten und technologische Entwicklung, Frankfurt 1972.
- Rose, H. (Hrsg.): Programmieren in der Werkstatt - Perspektiven für Facharbeit mit CNC-Maschinen, Frankfurt/New York 1990.
- Rosenberg, J.: The Trouble with DNC. In: M.A. DeVries (ed.): NC: 1971 - The Opening Door to Productivity and Profit, Numerical Control Society, Princeton/New York 1971, pp. 38-50.
- Rosenberg, N.: Technischer Fortschritt in der Werkzeugmaschinenindustrie 1840-1910. In: R. Rürup; K. Hansen (Hrsg.): Moderne Technikgeschichte, Köln 1975, S. 216-242.
- Rosenberg, N.: Inside the Black Box - Technology and Economics, Cambridge et al. 1982.

- Rosenbrock, H.H.: Technikentwicklung - Gestaltung ist machbar. Hrsg. v.d. IG Metall, Frankfurt, November 1984.
- Rössel, P.: Sinumerik 52 - Eine numerische Drehmaschinensteuerung mit Halbleiterspeicher. In: Siemens-Zeitschrift, Heft 47, Beiheft "Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine", 1973, S. 20-24.
- Rossnagel, P.: Stand und Entwicklungstendenzen der NC-Technik in der Bundesrepublik Deutschland. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 8, 116. Jg., 1983, S. IX-XII.
- Ruby, J.: Der Weg von der Drehmaschine zum Drehautomaten im deutschen Werkzeugmaschinenbau, hektogr. Manuskript, München 1991.
- Sandford, J.: Low-Cost NC Contouring. In: AM (American Machinist), No. 9, Vol. 110, 1966, pp. 83-85.
- Scharpf, F.W.: Verhandlungssysteme, Verteilungskonflikte und Pathologien der politischen Steuerung. In: M.G. Schmidt (Hrsg.): Staatstätigkeit, Opladen 1988, S. 61-87.
- Scherrer, Ch.: Im Bann des Fordismus - Die Auto- und Stahlindustrie der USA im internationalen Konkurrenzkampf, Berlin 1992.
- Schiffelmann, H.: NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen. In: ZWF, Heft 4, 1981, S. 162-165.
- Schmid, W.: Automatologie - Grundlagen der Selbststeuerung von Fertigungsmaschinen, München 1952.
- Schmiede, R.: Das deutsche "Wirtschaftswunder" 1945-1965. In: B. Blanke u.a. (Red.): Die Linke im Rechtsstaat, Berlin 1976, S. 107-138.
- Schmiede, R.: Abstrakte Arbeit und Automation. In: Leviathan, Heft 1, 11. Jg., 1983, S. 55-78.
- Schmiede, R.: Information und kapitalistische Produktionsweise. In: Th. Malsch; U. Mill (Hrsg.): ArBYTE - Modernisierung der Industriesoziologie? Berlin 1992, S. 53-86.
- Schneider, R.; Welsch, J.: Zwischen Unternehmenskooperation und Konzentration - Die Software-Industrie, hektogr., DGB Abt. Technologie/HdA, Düsseldorf 1992.
- Schultz-Wild, R.; Nuber, Ch.; Rehberg, F.; Schmierl, K.: An der Schwelle zu CIM - Strategien, Verbreitung, Auswirkungen, Eschborn/Köln 1989.
- Schultz-Wild, R.; Weltz, F.: Technischer Wandel und Industriebetrieb - Die Einführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik, Frankfurt 1973.
- Schulz, H.: Die Werkzeugmaschine aus heutiger Sicht. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 1, 97. Jg., 1964, S. 55-96.
- Schulz, H.: Revolverdrehmaschine mit ausbaubaren Automatisierungsstufen. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 8, 1966, S. 555-557.
- Schulz, H.: Die Werkzeugmaschine - Maß und Motor des technischen Fortschritts. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 12, 114. Jg., 1981, S. 843-844.

- Schulz, H.: Japans Strategien zur Technologie-Entwicklung. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 1, 118. Jg., 1985, S. 7-10.
- Schulz, H.: Tendenzen beim Einsatz flexibler Fertigungssysteme. In: H. Hirsch-Kreinsen; R. Schultz-Wild (Hrsg.): Rechnerintegrierte Produktion, Frankfurt/New York 1986, S. 83-109.
- Schulz, H.; Eibeck, G.: Werkzeugmaschine und numerische Steuerung verschmelzen immer mehr. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 12, 97. Jg., 1964, S. 886-901.
- Seitz, K.: Die japanisch-amerikanische Herausforderung, München 1990.
- Semlinger, K.: Effizienz und Autonomie in Zulieferungsnetzwerken - zum strategischen Gehalt von Kooperation. In: W.H. Staehle; J. Sydow (Hrsg.): Managementforschung, Band 3, Berlin/New York 1993.
- Sengenberger, W.: Struktur und Funktionsweise von Arbeitsmärkten - Die Bundesrepublik Deutschland im internationalen Vergleich, Frankfurt/New York 1987.
- Shaiken, H.: Neue Technologien und Organisation der Arbeit. In: Leviathan, Heft 2, 1980, S. 190-211.
- Siemens Firmenunterlage: Sinumerik S.
- Siemens-Zeitschrift, Heft 44, Beiheft "Numerische Steuerungen", Erlangen 1970.
- Siemens-Zeitschrift, Heft 47, Beiheft "Steuerungen und Antriebe zur Automatisierung der Werkzeugmaschine", Erlangen 1973.
- Simon, W.: Steuerungsprobleme moderner Werkzeugmaschinen in kritischer Betrachtung, Habilitationsschrift, TH Darmstadt, Darmstadt 1962.
- Simon, W.: Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen, München 1963.
- Simon, W.: Zusammenfassende Betrachtung zur USA-Studienreise. In: RKW (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964, S. 48-53.
- Simon, W.: NC-Maschinen und Betriebsorganisation. In: W. Simon (Hrsg.): Produktivitätsverbesserungen mit NC-Maschinen und Computern, München 1969, S. 21-42.
- Simon, W.: Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen, 2. Auflage, München 1971.
- Smith, D.N.; McCarroll, J.D.: Gegenwärtige Trends bei der numerischen Steuerung. In: technica, Heft 12, 1969, S. 15-28.
- de Solla Price, D.: The Science/Technology Relationship, the Craft of Experimental Science and Policy for the Improvement of High Technology Innovation. In: Research Policy, No. 1, Vol. 13, 1984, pp. 3-20.
- Sorge, A.; Hartmann, G.; Warner, M.; Nicholas, I.: Mikroelektronik und Arbeit in der Industrie - Erfahrungen beim Einsatz von CNC-Maschinen in Großbritannien und der Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt/New York 1982.
- Spizig, S.J.: Werkzeugmaschinen-Ausstellung 1974 in Chicago. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 1, 108. Jg., 1975, S. 25-34.

- Spur, G.: Produktionstechnik im Wandel, München/Wien 1979.
- Spur, G.: Über intelligente Maschinen und die Zukunft der Fabrik. In: Forschungs-Mitteilungen der DFG, Heft 3, 1984, S. I-VIII.
- Spur, G.: Die informationstechnische Herausforderung. In: Produktionstechnisches Kolloquium 1986, vervielf. Manuskript, Berlin 1986, S. 5-19.
- Spur, G.: Vom Wandel der industriellen Welt durch Werkzeugmaschinen, München/Wien 1991.
- Spur, G.; Tannenber, F.: Das Programmiersystem EXAPT. In: ZWF, Heft 6, 62. Jg., 1967, S. 269-272.
- Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch 1992 für das Ausland, Stuttgart 1992.
- Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart, verschiedene Jahrgänge.
- Steiner, A.: Technikgenese in der DDR am Beispiel der Entwicklung der numerischen Steuerung. In: Technikgeschichte, Heft 4, 1993 (im Erscheinen).
- Stöckmann, P.: Der praktische Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen im Betrieb. In: RKW (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964, S. 34-41.
- Storr, A.: Eine Welt produktiver Ideen - Internationale Werkzeugmaschinenausstellung in Chicago 1974. In: wt, Heft 5, 64. Jg., 1974, S. 281-287.
- Stromberger, C.: Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen - Eine Betrachtung aus europäischer Sicht. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 9, 99. Jg., 1966, S. 597-608.
- Stute, G.: Steuerungen an Werkzeugmaschinen. Tagungsberichte des ICM 77 - Internationaler Congress für Metallbearbeitung. Hrsg. v. VDW, Frankfurt 1977.
- Thurrow, L.C.: A Weakness in Process Technology. In: Science, No. 18, Vol. 238, 1987, pp. 1659-1663.
- Thurrow, L.C.: Head To Head - The Coming Economic Battle Among Japan, Europe, and America, New York 1992.
- Tolksdorf, G.: Einflüsse auf die Generierung von moderner Produktionstechnik, hektogr. Manuskript, Bielefeld 1989.
- Uhrmeister, H.: Tonbandsteuerungen für Werkzeugmaschinen, Forschungsberichte Automatisierung, Essen 1956.
- Uhrmeister, H.: Einige Möglichkeiten zur selbsttätigen Lageeinstellung von Werkzeugmaschinen. In: Werkstattstechnik und Maschinenbau, Heft 9, 48. Jg., 1958, S. 480-486.
- Ullrich, O.: Technik und Herrschaft - Vom Handwerk zur verdinglichten Blockstruktur industrieller Produktion, Frankfurt 1977.
- United States Bureau of the Census: Census of Manufactures, 1972, Vol. II, Industry Statistics Part 1, SIC Major Groups 20-26, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 1976.

- United States Bureau of the Census: Annual Survey of the Manufactures, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., verschiedene Jahrgänge.
- United States Bureau of the Census: Statistical Abstract of the United States, Washington D.C., verschiedene Jahrgänge.
- United States Department of Commerce: Fifteen Years of Numerically Controlled Machine Tools, 1954-1968, Superintendent of Documents, Government Printing Office, Washington D.C., October 1969.
- VDI (Hrsg.): Schlüsseltechnologien, Düsseldorf 1986.
- VDI-Nachrichten, verschiedene Jahrgänge.
- VDI-Z, verschiedene Jahrgänge.
- VDMA (Verein Deutscher Maschinenbauanstalten): Die deutsche Maschinenbauindustrie, Frankfurt 1980.
- VDMA: Ingenieur-Erhebung im Maschinen- und Anlagenbau - Ergebnisse der VDMA-Studie, hektogr. Manuskript, Frankfurt 1988.
- VDMA: Hundert Jahre Maschinenbau im Spiegel der Statistik, hektogr. Manuskript, Frankfurt 1992.
- VDMA: Statistisches Handbuch für den Maschinenbau, Frankfurt, verschiedene Jahrgänge.
- VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.): Altersstruktur des industriellen Werkzeugmaschinenparks in der Bundesrepublik Deutschland, hektogr. Berichte, Frankfurt 1976/1980/1986/1991.
- VDW: Sonderumfrage 1991 - Statistik über numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, Frankfurt, September 1992.
- Vernon, R.: Can U.S. Manufacturing Come Back? In: Harvard Business Review, July-August 1986, pp. 98-106.
- Vettermann, G.: Forschung für den Maschinen- und Anlagenbau. In: Frankfurter Allgemeine Zeitung, 9.4.1991, S. B 8.
- Vilmar, F.: Rüstung und Abrüstung im Spätkapitalismus, 4. Auflage, Frankfurt 1969.
- Voelzkow, H.: Die Normung von CIM-Schnittstellen, Arbeitspapier, SFB 187, Bochum 1989.
- Wagoner, H.D.: The US Machine Tool Industry from 1900 to 1950, Cambridge/Mass. 1968.
- Walker, Th.: Programmieren an einer CNC mit Handeingabe. In: wt, 68. Jg., 1978, S. 325-328.
- Waller, S.: Praktische Ausführungsformen numerischer Steuerungen für Werkzeugmaschinen in den USA. In: RKW (Hrsg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtsreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt 1964, S. 19-21.
- WB (Werkstatt und Betrieb), verschiedene Jahrgänge.

- Weber, W.: CNC-Steuerungen für qualifizierte Facharbeit. In: Technische Rundschau, Heft 28, 1988, S. 15-18.
- Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Band 3 "Automatisierung und Steuerungstechnik", Düsseldorf 1982.
- Weck, M.; Verhaag, E.: Nutzung der Prozeßrechnerfähigkeiten zum Aufbau neuer CNC-Konzepte. In: wt, Heft 9, 66. Jg., 1976, S. 497-501.
- Weingart, P.: Das Verhältnis von Wissenschaft und Technik im Wandel ihrer Institutionen. In: KZfSS, Wissenschaftssoziologie, Sonderheft 18, 1976, S. 393-418.
- Weingart, P.: Strukturen technologischen Wandels - Zu einer soziologischen Analyse der Technik. In: R. Jokisch (Hrsg.): Techniksoziologie, Frankfurt 1982.
- Werner, G. u.a.: Triebkräfte und Bedingungen der innovativen Prozeßentwicklung in der Fertigungstechnik, dargestellt an ausgewählten Beispielen. In: Tagungsband 2. Bremer Symposium "Arbeit und Technik" vom 10.-13.6.1987, Bremen 1987, S. 61-75.
- Widl, G.: DNC - CNC - Die vierte Generation numerischer Steuerungen. In: Werkstatt und Betrieb, Heft 8, 104. Jg., 1971, S. 553-558.
- Williams, J.C.: NC Comes Full Circle in the US Army. In: M.A. DeVries (ed.): NC: 1971 - The Opening Door to Productivity and Profit, Numerical Control Society, Princeton/New York 1971, pp. 1-21.
- Williamson, O.E.: The Economic Institutions of Capitalism - Firms, Markets, Relational Contracting, New York/London 1985.
- Wobbe, W.: CIM in den USA - Wo der Mensch keine Rolle spielt. In: Mega, Heft 1, 1988, S. 75-78.
- Wolf, H.: Der Wandel der betrieblichen "Informationsform" und die Rationalisierung technisch-geistiger Arbeit. In: SOFI-Mitteilungen, Nr. 19, 1992, S. 1-14.
- Wolf, H.; O. Mickler; F. Manske: Eingriffe in Kopfarbeit, Berlin 1992.
- wt (Werkstattstechnik), verschiedene Jahrgänge.
- Zeppelin, W. v.: Wider die Arbeitsteilung, hektogr. Manuskript, Reichenbach/Fils o.J.
- Ziegler, N.J.: Retooling the Industrial Plant, Diss., MIT, Cambridge/Mass. 1989.
- Zusman, R.: Mechanics of the Middle Class - Work and Politics among American Engineers, Berkley/Los Angeles/London 1985.

DAS INSTITUT FÜR SOZIALWISSENSCHAFTLICHE FORSCHUNG E.V. - ISF MÜNCHEN -

Das ISF ist ein eingetragener Verein mit anerkannter Gemeinnützigkeit. Es besteht seit 1965. Mitglieder des Vereins sind überwiegend langjährige Mitarbeiter des ISF.

Die Leitung des Instituts obliegt einem Institutsrat, der aus wissenschaftlichen Mitarbeitern und einer Verwaltungsangestellten besteht. Alle sind langjährige Mitarbeiter des ISF; sie zeichnen für jeweils unterschiedliche Ressorts verantwortlich.

Den Forschungsschwerpunkten entsprechend arbeiten drei bis sechs Wissenschaftler gleichberechtigt in eigenverantwortlichen Projektgruppen zusammen. Sie führen neben den Projekten der Auftragsforschung auch theoretische Grundlagenarbeiten im Rahmen des Sonderforschungsberichts 333 "Entwicklungsperspektiven von Arbeit" der Ludwig-Maximilians-Universität München durch. Überschneidungen in der Zuständigkeit einzelner Wissenschaftler für Teilprojekte dienen dem Erfahrungsaustausch, der gemeinsamen Weiterentwicklung theoretischer Ansätze sowie der Koordination und Abklärung der Forschungsergebnisse. Synergieeffekte können auf diese Weise erreicht werden.

Derzeit beschäftigt das ISF rd. 25 fest angestellte wissenschaftliche Mitarbeiter mit sozial-, wirtschafts- und ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, nicht selten mit einer Zusatz- oder Doppelqualifikation (Wirtschaftswissenschaften/Soziologie, Jurisprudenz/Soziologie bzw. Nationalökonomie, Ingenieurwissenschaften/Soziologie, Psychologie/Nationalökonomie). Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist damit gewährleistet, der Schwerpunkt liegt bei der Industriesoziologie. Die wissenschaftlichen Mitarbeiter haben überwiegend langjährige Forschungserfahrung. Mehr als zehn Mitarbeiterinnen kümmern sich um Organisations-, Verwaltungs- und Schreibarbeiten. Wissenschaftliche und studentische Hilfskräfte und zeitweilig herangezogene Experten für Spezialgebiete ergänzen den Mitarbeiterstab.

Ein Überblick über die bisherigen Arbeiten und Veröffentlichungen ist über das Institut erhältlich.

INSTITUT FÜR SOZIALWISSENSCHAFTLICHE FORSCHUNG E.V. - ISF MÜNCHEN
Jakob-Klar-Straße 9 - 80796 München - Tel. 089/272921-0 - Fax 089/272921-60

Ausgewählte Buchveröffentlichungen 1988 - 1994

- Böhle, Fritz; Milkau, Brigitte: Vom Handrad zum Bildschirm - Eine Untersuchung zur sinnlichen Erfahrung im Arbeitsprozeß, Frankfurt/New York 1988.
- Ernst, Angelika: Dauerbeschäftigung und Flexibilität in Japan - Beschäftigungspolitik japanischer Unternehmen in Rationalisierungs- und Krisenphasen, Frankfurt/New York 1988.
- ISF München (Hrsg.): Arbeitsorganisation bei rechnerintegrierter Produktion - Zur Einführung neuer Techniken in der Metallindustrie, KfK-PFT 137, Karlsruhe 1988.
- Altmann, Norbert; Sauer, Dieter (Hrsg.): Systemische Rationalisierung und Zulieferindustrie - Sozialwissenschaftliche Aspekte zwischenbetrieblicher Arbeitsteilung, Frankfurt/New York 1989.
- Döhl, Volker; Altmann, Norbert; Deiß, Manfred; Sauer, Dieter: Neue Rationalisierungsstrategien in der Möbelindustrie I - Markt und Technikeinsatz, Frankfurt/New York 1989.
- Deiß, Manfred; Altmann, Norbert; Döhl, Volker; Sauer, Dieter: Neue Rationalisierungsstrategien in der Möbelindustrie II - Folgen für die Beschäftigten, Frankfurt/New York 1989.
- Düll, Klaus; Lutz, Burkart (Hrsg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich - Fünf Aufsätze zur Zukunft industrieller Arbeit, Frankfurt/New York 1989.
- ISF München (Hrsg.): Strategische Optionen der Organisations- und Personalentwicklung bei CIM - Beiträge zur Initiative CIM-Technologie-Transfer, KfK-PFT 148, Karlsruhe 1989.
- Köhler, Christoph; Preisendörfer, Peter (Hrsg.): Betrieblicher Arbeitsmarkt im Umbruch - Analysen zur Mobilität, Segmentation und Dynamik in einem Großbetrieb, Frankfurt/New York 1989.
- Lutz, Burkart; Moldaschl, Manfred: Expertensysteme und industrielle Facharbeit - Ein Gutachten über denkbare qualifikatorische Auswirkungen von Expertensystemen in der fertigenden Industrie, Frankfurt/New York 1989.
- Schultz-Wild, Rainer; Nuber, Christoph; Rehberg, Frank; Schmierl, Klaus: An der Schwelle zu CIM - Strategien, Verbreitung, Auswirkungen, RKW-Verlag, Verlag TÜV Rheinland, Eschborn/Köln 1989.
- Behr, Marhild von; Köhler, Christoph (Hrsg.): Werkstattoffene CIM-Konzepte - Alternativen für CAD/CAM und Fertigungssteuerung, KfK-PFT 157, Karlsruhe 1990.
- Deiß, Manfred; Döhl, Volker; Sauer, Dieter, unter Mitarbeit von Altmann, Norbert: Technikherstellung und Technikanwendung im Werkzeugmaschinenbau - Automatisierte Werkstückhandhabung und ihre Folgen für die Arbeit, Frankfurt/New York 1990.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut; Schultz-Wild, Rainer; Köhler, Christoph; Behr, Marhild von: Einstieg in die rechnerintegrierte Produktion - Alternative Entwicklungspfade der Industriearbeit im Maschinenbau, Frankfurt/New York 1990.
- Rose, Helmuth (Hrsg.): Programmieren in der Werkstatt - Perspektiven für Facharbeit mit CNC-Maschinen, Frankfurt/New York 1990.