

Nationale Entwicklungspfade der Fertigungstechnik: NC-Technik in den USA und in Deutschland

VON HARTMUT HIRSCH-KREINSEN

Überblick

Technikentwicklung folgt nicht einem einzigen „one best way“, sondern alternativen Entwicklungspfaden. Exemplarisch hierfür steht die amerikanische und deutsche Entwicklung von NC-Steuerungen für Werkzeugmaschinen – bis heute eine Basistechnologie für die industrielle Metallverarbeitung. Obgleich diese Technik Ende der 1940er Jahre in den USA erfunden worden ist und die amerikanische Entwicklung Vorbild auch gerade für die NC-Entwicklung in Deutschland war, sind bis weit in die 1980er Jahre hinein deutliche Entwicklungsunterschiede zwischen den USA und Deutschland erkennbar. Die Ursachen für die verschiedenen Entwicklungspfade lassen sich vor allem auf den Einfluss nationalspezifischer sozialer und ökonomischer Entwicklungs- und Anwendungsbedingungen zurückführen. Zu nennen sind hier besonders sehr verschiedene Entwicklerkonstellationen, die ihrerseits mit je nationalspezifischen Industriestrukturen und institutionellen Bedingungen der jeweiligen FuE-Systeme verwoben sind.

Abstract

Technological development does not follow one universal best way rather it follows different paths. A comparison of the American and the German development of numerical controllers for machine tools – a basic technology for the metal working industries – can support this thesis. This technology was invented in the U.S. at the end of the 1940ies and the way it was realized was the exemplar guiding corresponding development work in Germany too. Nonetheless, the development of control systems took a different course in the two countries until the 1980ies. The article argues that the dissimilarities of the national development paths can be explained with recourse to the specific social and economic conditions for design and application of NC-technologies. Of major importance are the different constellations of actors involved in the development which are embedded in nation-specific industrial structures and the respective national systems of science and research.

1. Einleitung

Computergesteuerte Werkzeugmaschinen, NC- bzw. CNC-Maschinen, können auf Grund ihrer fertigungstechnischen und ökonomischen Bedeutung für die Produktionsprozesse der Metallindustrie seit mehr als 30 Jahren als eine Schlüsseltechnologie angesehen werden. Während konventionelle Formen der Automatisierung wie etwa Drehautomaten aufgrund ihres oft hohen Umrüstaufwandes wirtschaftlich nur in der Großserien- und Massenfertigung nutzbar waren, wurden mit der NC-Technik auch die komplexen, heterogenen und qualifikationsintensiven Produktionsprozesse in der metallverarbeitenden Einzel- bis Mittelserienfertigung einer Automatisierung zugänglich gemacht. Denn durch ihre leichte Umprogrammierbarkeit kann sie im Prinzip schnell und kostengünstig an wechselnde Produktionserfordernisse angepasst werden. In der arbeits- und industriesoziologischen Forschung wurde dieser Form der „flexiblen Automatisierung“ denn auch relativ bald große Aufmerksamkeit geschenkt, sah man in ihr doch ein Rationalisierungsinstrument, mit dem die Durchsetzung tayloristischer Rationalisierungsprinzipien, insbesondere die Trennung von Planung und Ausführung, auch in der komplexen Einzel- bis Mittelserienfertigung gelingen würde.¹ Denn offenbar erforderte die neue Technik scheinbar technisch zwangsläufig eine Trennung von Planung und Ausführung der Arbeit, da offenbar eine von der Werkstatt separate Vorprogrammierung der Maschinen notwendig war. Als arbeitspolitische Konsequenz fürchtete man, dass die zuvor qualifizierten und relativ autonomen Maschinenbedienertätigkeiten an konventionellen Werkzeugmaschinen verschwinden würden und der Einsatz von gering qualifizierten Arbeitskräften für die nur mehr reine Überwachung der Maschinenprozesse möglich wäre.

Indes zeigten bald eine Reihe weiterer Untersuchungen, dass sich mit dem Einsatz der NC-Technik nicht nur sehr unterschiedliche Formen der Arbeitsorganisation verbanden,² sondern die Technikentwicklung selbst unterschiedlichen Richtungen folgte. Darauf verwies insbesondere auch der amerikanische Technikhistoriker David F. Noble mit seiner materialreichen

- 1 Otfried Mickler, Wilma Mohr u. Ulf Kadritzke, *Produktion und Qualifikation*, Bd. I u. II, Göttingen 1977; Otfried Mickler, *Facharbeit im Wandel – Rationalisierung im industriellen Produktionsprozeß*, Frankfurt, New York 1981; Karin Benz-Overhage, Eva Brumlop, Thomas von Freyberg u. Zissis Papadimitriou, *Neue Technologien und alternative Arbeitsgestaltung – Auswirkungen des Computereinsatzes in der industriellen Produktion*, Frankfurt a.M., New York 1982.
- 2 Thomas Pirker, Rainer Schultz-Wild u. Friedrich Weltz, *Automation und Rationalisierung – Die Einführung der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik*, hektogr. Bericht, München 1970 und die spätere Buchpublikation: Rainer Schultz-Wild u. Friedrich Weltz, *Technischer Wandel und Industriebetrieb – Die Einführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik*, Frankfurt a.M. 1973 sowie Joachim Bergmann, Hartmut Hirsch-Kreinsen, Roland Springer u. Harald Wolf, *Rationalisierung, Technisierung und Kontrolle des Arbeitsprozesses – Die Einführung der CNC-Technologie in Betrieben des Maschinenbaus*, Frankfurt a.M., New York 1986.

und international bekannt gewordenen Studie *Forces of Production* über die Entwicklung der NC-gesteuerten Werkzeugmaschinen in den USA.³ Das besondere Verdienst dieser Studie liegt darin zu zeigen, dass erstens bei fertigungstechnischer Entwicklung Alternativen existieren und dass zweitens die Prozesse der Auswahl sozial und politisch bestimmt sind. Noble spricht von „social choices“ bei der Technikentwicklung.⁴ Dabei sieht er Herrschafts- und Kontrollinteressen der Technikentwickler und des Managements in Unternehmen als entscheidenden Faktor dafür an, dass sich in den USA sehr schnell ein Entwicklungspfad der NC-Technik herausgebildet hat, der auf eine Degradierung zuvor qualifizierter Maschinenarbeit und eine Steigerung der Kontrollierbarkeit des Produktionsprozesses durch das Management hinausläuft. Im Gegensatz dazu legen vor allem auch einige eher beiläufige Bemerkungen von Noble die Annahme nahe, dass die Entwicklung dieser Technik in Deutschland einen anderen Weg gegangen ist und sie sich an den qualifizierten Facharbeitern und den vergleichsweise wenig arbeitsteiligen Produktionsprozessen in der deutschen Metallindustrie orientiert hat.⁵

Diesen Hinweisen auf international unterschiedliche Verläufe der Technikentwicklung soll im Folgenden genauer nachgegangen werden.⁶ Dabei wird davon ausgegangen, dass Nobles Interpretation der NC-Entwicklung der kritischen Ergänzung bedarf. Seine Sicht der Entwicklung dieser Technik bezieht sich in erster Linie auf die amerikanische Entwicklung, und er steht dabei im Kontext der Kontrolldebatte der anglo-amerikanischen Industrie-soziologie der 1970er und 1980er Jahre.⁷ In international vergleichender Per-

- 3 David F. Noble, *Forces of Production – A Social History of Industrial Automation*, New York 1984; ders., *Social Choice in Machine Design: The Case of Automatically Controlled Machine Tools*, in: Andrew Zimbalist (Hg.): *Case Studies on the Labor Process*, New York, London 1979, S. 18-50; ders., *Maschinen gegen Menschen – Die Entwicklung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen*, Stuttgart 1979; ders., *Die Entwicklung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen*, in: ders. (Hg.), *Maschinenstürmer*, Berlin 1986, S. 98-136.
- 4 Eine These, die in der späteren sozialwissenschaftlichen Technikgeneseforschung geradezu paradigmatischen Charakter gewann, ohne dass Nobles Argumente dabei wirklich rezipiert worden sind; zusammenfassend z.B. Werner Rammert, *Die Technik in der Gesellschaft. Forschungsfelder und theoretische Leitdifferenzen im Deutschland der 90er Jahre*, Verbund Sozialwissenschaftliche Technikforschung, Mitteilungen 13, Köln, Dezember 1994.
- 5 Noble, *Forces of Production* (wie Anm. 3), S. 222.
- 6 Die folgenden Ausführungen resümieren die Ergebnisse einer empirisch-historischen Studie, die Anfang der 1990er Jahre am ISF München im Kontext des damaligen SFB 333 „Entwicklungsperspektiven von Arbeit“ durchgeführt wurde: Hartmut Hirsch-Kreinsen, *NC-Entwicklung als gesellschaftlicher Prozess. Amerikanische und deutsche Innovationsmuster der Fertigungstechnik*, Frankfurt a.M., New York 1993.
- 7 Harry Braverman, *Die Arbeit im modernen Produktionsprozess*, Frankfurt a.M., New York 1977; Harley Shaiken, *Neue Technologien und Organisation der Arbeit*, in: Levia-than 8, 1980, S. 190-211; Richard Edwards, *Herrschaft im modernen Produktionsprozess*, Frankfurt a.M. 1981.

spektive verlieren jedoch die von Noble akzentuierten Momente von Herrschaft und Kontrolle im Arbeitsprozess einen Gutteil ihrer Erklärungskraft, und es ist darüber hinaus der Einfluss je spezifischer gesellschaftsstruktureller Momente auf den Prozess der Technikentwicklung in Rechnung zu stellen. 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.

Im Folgenden sollen daher in einem ersten Schritt die nationalspezifischen Differenzen der Technikentwicklung zwischen den USA und der Bundesrepublik Deutschland für den Zeitraum ihrer Erfindung Ende der 1940er Jahre bis etwa Mitte der 1980er Jahre in der hier gebotenen Kürze nachgezeichnet werden. Unterscheidendes Merkmal ist, inwieweit die technische Auslegung von NC-Steuerungen eine Trennung von Planung und Ausführung erfordert oder hierfür arbeitsorganisatorische Spielräume offen lässt. Empirisch festgestellt werden kann dieses daran, inwieweit NC-Steuerungen aufgrund der Auslegung der „Mensch-Maschine-Schnittstelle“ und ihrer generellen technischen Komplexität eine direkte Programmierung in der Werkstatt – „Werkstattprogrammierung“ – erlauben oder ihr Betrieb aufwändige Büroprogrammiersysteme erfordert. In einem zweiten Schritt soll eine Reihe von Hypothesen zum Zusammenhang von Technikentwicklung und sozio-ökonomischen Einflussbedingungen im Vergleich zwischen den USA und Deutschland zur Diskussion gestellt werden. In einem dritten Schritt soll zumindest angedeutet werden, welche theoretischen Überlegungen sich daraus ergeben können. Basis der empirischen Befunde sind u.a. mehr als 30 ausführliche Expertengespräche mit den Vertretern der „ersten Generation“ von amerikanischen und deutschen NC-Experten. So konnte im Frühjahr 1991 ein vielstündiges Interview mit den als Erfindern der NC-Technik geltenden John T. Parsons und Frank Stulen in Traverse City/Michigan geführt werden.

2. Fertigungstechnische Entwicklungspfade

2.1 Genereller Entwicklungsverlauf

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.⁸ 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

8 Wilhelm Simon, Die numerische Steuerung von Werkzeugmaschinen, München 1963, S. 320; Manfred Weck, Werkzeugmaschinen, Bd. 3: Automatisierung und Steuerungstechnik, Düsseldorf 1982, S. 123ff.

werden. Im praktischen Betrieb sind die Steuerungsanweisungen in einem Teile- oder Bearbeitungsprogramm mit alphanumerischen Zeichen zusammengefasst, das nach genormten Regeln erstellt wird. Damit wird die direkte Handsteuerung, wie sie an konventionellen Werkzeugmaschinen über die verschiedensten mechanischen oder elektrischen Bedienungselemente notwendig ist, ersetzt. Der Arbeitsvorgang der Maschinensteuerung wird automatisiert, indem die Informationen des Teileprogramms informationstechnisch in Maschinenbewegungen und Bearbeitungsoperationen von Werkzeugen umgesetzt werden.

Als Erfinder der NC-Technik gilt, sieht man einmal von verschiedenen Vorläuferversuchen ab, John T. Parsons, der in seiner Firma, der Parsons Corporation in Traverse City/Michigan, gegen Ende des Zweiten Weltkrieges vor dem Problem stand, den Fertigungsprozess von Rotorblättern für Hubschrauber zu rationalisieren. Sein Ziel war es, die für den Fertigungsprozess erforderlichen Schablonen nicht weiterhin wie bisher in aufwändiger manueller Weise, sondern auf der Basis einer numerischen Beschreibung des Werkstückes und einer solche Daten verarbeitenden Maschinensteuerung automatisch herzustellen. Die Überlegung von Parsons war, den Konstruktionsrechner seines Ingenieurs Frank Stulen zu nutzen, um Lochkarten mit Koordinatenwerten für die Schablonen auszudrucken, und mit Hilfe der Lochkarten eine Werkzeugmaschine zu steuern. Zunächst sollte dies eine Bohrmaschine sein. 1948 wurde daraus das Konzept einer lochkartengesteuerten Fräsmaschine, das Cardamatic-System, mit dem die Konturen der Schablonen für die Rotorblätter herausgearbeitet werden sollten. Dieses Grundkonzept ist in den darauf folgenden Jahren am Servomechanism Laboratory (Servo Lab) des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge/Massachusetts weiter entwickelt worden, wo 1952 eine vergleichsweise ausgefeilte NC-Maschine vom Typ Cincinnati Hydrotel der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Es handelte sich dabei um eine dreiachsen-bahngesteuerte Vertikalfräsmaschine, deren außerhalb des Maschinenbereichs kodierte Programm über Lochstreifen in eine Digitalsteuerung eingegeben wurde. Diese Maschine gilt weithin als *der Prototyp* einer NC-Maschine.⁹

Im historischen Rückblick lässt sich sagen, dass die NC-Technik seitdem mehrere Entwicklungsstadien durchlief, die recht präzise die generelle Entwicklung der Computertechnologie widerspiegeln. Auf der Basis der Röhren- und Relaisstechnologie der 1950er Jahre und der Transistor- und Halbleitertechnologie in den 1960er Jahren wurden „konventionelle“ NC-Steuerungen entwickelt, bei denen die Funktionszusammenhänge der Steuerungen „fest verdrahtet“ mit diskreten Bauelementen realisiert wurden. Ab dem Beginn der 1970er Jahre wurden zunehmend und später ausschließlich die Mikroelektronik mit Mikroprozessoren und hochintegrierten Halbleiterspei-

9 Günter Spur, Produktionstechnik im Wandel, München, Wien 1979.

chern für die NC-Entwicklung genutzt. Sie erlaubten die Verwendung von frei programmierbaren Rechnern und umfangreichen Datenspeichern anstelle der bisherigen funktionspezifisch ausgelegten Bauelemente und Hardwaresteuerungen. Möglich wurden damit CNC-Steuerungen (Computerized Numerical Control), zunächst auf der Basis von Minicomputern, später von Mikrocomputern. 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 im Prinzip über eine Software-Anpassung realisiert werden. Diese neuen Möglichkeiten der Informationstechnologie erlaubten jetzt die 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.

Folgt man der ingenieurwissenschaftlichen Literatur, so verband sich mit den verschiedenen Basistechnologien eine ständige und insgesamt schnelle Weiterentwicklung der NC-Technik:¹⁰ Betont wird zum einen die ständige Steigerung des Funktionsumfangs, der Flexibilität, der Zuverlässigkeit und der Leistungsfähigkeit der Steuerungen, wobei Preis und Kosten der Steuerungen kontinuierlich fielen. Betont wird zum zweiten die verbesserte und erheblich vereinfachte Programmierbarkeit vor allem der CNC-Steuerungen. Neben einer ganzen Reihe von Programmiererleichterungen wird insbesondere auf die immer leichtere direkte Programmierbarkeit der Steuerungen an den Maschinen verwiesen. Freilich bleiben in dieser generellen Perspektive verschiedene Entwicklungspfade der NC-Technik ausgeblendet.

2.2 Nationalspezifische Entwicklungspfade

Resümiert man die vorliegenden empirischen Befunde,¹¹ so können drei mehr oder weniger deutlich unterscheidbare und parallel verlaufende Entwicklungspfade der NC-Technik in den USA und der Bundesrepublik ausgemacht werden: ein Pfad *weitreichender Automatisierung*, ein Pfad *begrenzter Automatisierung* und ein *werkstatorientierter Pfad*. Angeknüpft wird damit an Beobachtungen deutscher Ingenieurwissenschaftler in den USA Anfang der 1960er Jahre, die auf verschiedene Entwicklungstendenzen bei der NC-Entwicklung in den USA und der Bundesrepublik hinwiesen. Sie unterschieden 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 wer-

10 Ebd.; Simon (wie Anm. 8); Weck (wie Anm. 8); Hans B. Kief, NC-Handbuch 1986, Michelstadt 1986.

11 Hirsch-Kreinsen (wie Anm. 6), S. 71ff.

den könnten.¹² Entsprechend lassen sich die Entwicklungspfade der NC-Technik wie folgt genauer beschreiben:

- Weitreichende Automatisierung in den USA: Die NC-Entwicklung in den USA folgte nahezu durchgängig von ihrem Beginn Anfang der 1950er Jahre bis in die 1980er Jahre hinein einem Pfad, der auf eine möglichst weitreichende Automatisierung der technischen Anlagen durch eine maximale Nutzung verfügbarer Computertechniken hinauslief. Als geradezu exemplarisch für diesen Entwicklungspfad kann der 1952 vom MIT vorgestellte Prototyp einer NC-gesteuerten Werkzeugmaschine angesehen werden. Zunächst relativ unabhängig von entstehenden Kosten sollten damit zuvor nur schwer zu bewältigende bzw. neu entstandene Bearbeitungsprobleme in der Luft- und Raumfahrtindustrie bewältigt werden können. Menschlicher Arbeit kam in diesem Konzept nur die Funktion einer Restgröße zu. Greifbar wird dies daran, dass die US-Entwicklung von der Dominanz relativ komplexer und aufwändiger Steuerungskonzeptionen, zunächst hauptsächlich Bahnsteuerungen für die Bearbeitung geometrisch besonders komplizierter Teile in der militärischen Luftfahrtindustrie, geprägt war. Arbeitsorganisatorisch liefen diese Steuerungskonzepte auf eine vom unmittelbaren Fertigungsprozess zeitlich und räumlich separierte Programmierung hinaus und sie boten in der Regel bis in die 1970er Jahre zunächst keine und später allenfalls sehr begrenzte Möglichkeiten für Werkstattprogrammierung durch die Korrektur einzelner Daten in den vorab erstellten Programmen. Erst im Verlauf der 1980er Jahre wurden in den USA NC-Steuerungen entwickelt, die zwar in größerem Umfang Möglichkeiten für Werkstattprogrammierung boten, dieser faktisch jedoch nur eine zur zentralen Programmierung komplementäre Funktion, etwa zur Bewältigung von Störungen und der Variation von Bearbeitungsparametern, zukommen ließ.
- Begrenzte Automatisierung in der Bundesrepublik: Demgegenüber folgte die westdeutsche NC-Technik einem Entwicklungspfad, mit dem sich das Ziel einer Automatisierung von Bearbeitungsprozessen auf dem Niveau einer nur eingeschränkten Komplexität verband. Hauptmerkmal dieses Entwicklungspfades war eine nur begrenzte Automatisierung der Steuerungen. Sein Ausgangspunkt war die Erfahrung, dass beim Einsatz von Fertigungstechnik eine maximale Automatisierung auf Grund der schwer kalkulierbaren Bedingungen des industriellen Produktionsprozesses sowohl technisch als auch zu vertretbaren Kosten nur in Sonderfällen möglich war. Dies hatte zur Folge, dass NC-Steuerungen neben einer häufig nur begrenzten Komplexität gewisse Möglichkeiten direkter personeller Eingriffe in den automatisierten Ablauf vorsahen. Anders

12 Wilhelm Simon, Zusammenfassende Betrachtung zur USA-Studienreise, in: RKW (Hg.): Numerische Steuerungen von Werkzeugmaschinen, Berichtreihe Auslandsdienst, A 30, Frankfurt a.M. 1964, S. 48-53.

formuliert, Maschinenarbeit war hier ein funktionsnotwendiges Komplement zur Automatisierung von Bearbeitungsprozessen. Diese NC-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland, die nach einigen Versuchen in der zweiten Hälfte der 1950er Jahre und Anfang der 1960er Jahre auf breiterer Front begann, zeichnete sich zunächst durch im Vergleich zu Bahnsteuerungen relativ einfachere Punkt- und Streckensteuerungen aus. Einerseits wurde dabei, wie bei vielen technischen Entwicklungsprojekten, auf die Erfahrungen aus den USA zurückgegriffen. Andererseits ging es aber darum, einen eigenständigen, deutschen industriellen Gegebenheiten angepassten Entwicklungspfad zu finden.¹³ Daher richtete sich die Entwicklung weit mehr als in den USA auf die Bewältigung sehr heterogener technologischer Bearbeitungsprobleme in verschiedensten Teilbranchen der Metallindustrie. Schließlich fanden sich trotz des auch hier im Prinzip verfolgten Konzepts einer separierten Maschinenprogrammierung relativ frühzeitig an einer ganzen Reihe gängiger Steuerungstypen Möglichkeiten für eine gewisse Werkstattprogrammierung, etwa in Form der Eingabe einzelner Programmkomponenten oder der Modifikation zentral erstellter Programmdateien. Diese Möglichkeiten wurden im Unterschied zur US-Entwicklung im Verlauf der 1960er Jahre und vor allem der 1970er Jahre nicht nur anfänglich bei einfacheren Steuerungstypen, sondern später auch bei komplexen Steuerungen weiterentwickelt und ständig ausgebaut.

- Werkstattorientierter Entwicklungspfad: Schließlich ist davon ein weiterer Entwicklungspfad zu unterscheiden, der als werkstattorientiert charakterisiert werden kann. Dieser Pfad eröffnete vom Konzept her weite Möglichkeiten der Werkstattprogrammierung. Eine zentrale Programmierung war entweder überhaupt nicht oder nur als Zusatzfunktion vorgesehen. Obgleich auch dem Ziel der Rationalisierung von Bearbeitungsprozessen verpflichtet, waren die Qualifikationen und Erfahrungen menschlicher Arbeit bei dieser Linie der NC-Technik Ausgangspunkt der Entwicklung. Vom Konzept her sollte über die damit intendierte hohe technisch-organisatorische Flexibilität eine Vielzahl von Barrieren und Problemen des NC-Einsatzes vermieden werden. In den USA war dieser Entwicklungspfad nur sehr sporadisch und selten im Verlauf der 1950er und 1960er Jahre anzutreffen. Zu nennen ist hier vor allem das Play-Back-Verfahren, das besonders in der sozialwissenschaftlichen Debatte große Prominenz gewann.¹⁴

13 Pirker/Schultz-Wild/Weltz Pirker (wie Anm. 2).

14 Noble, Maschinen gegen Menschen (wie Anm. 3); Peter Brödner u. Friedrich Hamke, Automatisierung und Arbeitsplatzstrukturen. In: MittAB (Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung), 1969, H. 8, S. 604-618; Akos Pauliny, Die Entwicklung der NC-Maschinen und das Liegenlassen der Record-Playback-Steuerungen im Maschinenbau der USA, in: ZATU Material (Hg.): Technikgeschichte und Gestaltungsmöglichkeiten, Kolloquium Nr. 6, Nürnberg 1990, S. 43-58.

Sieht man von Ausnahmen ab, wurden derartige Konzepte in den USA teilweise mit japanischer Kooperation erst in den 1980er Jahren auf breiterer Front aufgegriffen. In der Bundesrepublik Deutschland hingegen wurde dieses Konzept schon vereinzelt in den 1950er Jahren angegangen und spätestens seit den 1960er Jahren systematisch und kontinuierlich bis zum heutigen Zeitpunkt verfolgt.¹⁵ Spätestens ab Mitte der 1970er Jahre wurde hier der werkstatorientierte NC-Pfad in Form der direkt an der Steuerung vorzunehmenden Handeigabe von Daten zur Basis eines überaus erfolgreichen Entwicklungsschubs der NC-Technik.

Realiter waren die Übergänge zwischen diesen Entwicklungspfaden zweifels- ohne fließend. Jedoch zielt diese analytische Unterscheidung einerseits darauf, die nationalspezifischen Entwicklungsdifferenzen der NC-Technik deutlich heraustreten zu lassen; andererseits soll damit der Blick auf die gleichsam hinter diesen Merkmalen stehenden sozialen und ökonomischen Bedingungen eröffnet werden. Zu nennen sind hier in erster Instanz die je spezifische Entwicklerkonstellation und in zweiter Instanz damit in Wechselwirkung stehende gesellschaftsstrukturelle Bedingungen. In der gebotenen Kürze können hier die folgenden Zusammenhänge herausgearbeitet werden.

3. Divergierende Entwicklerkonstellationen

3.1 USA: Verbund aus Big Science, Militär und Großbetrieben

Vergleicht man die an der NC-Entwicklung beteiligten Akteure, so zeigen sich einerseits gewisse Ähnlichkeiten zwischen den USA und der Bundesrepublik Deutschland, die die in beiden Ländern durchgängige und hohe Bedeutung von elektrotechnischen Unternehmen und Rechnerherstellern bei der Steuerungsentwicklung betreffen. Diese bestimmten nicht nur in den USA, sondern auch in der Bundesrepublik Deutschland über lange Jahre hinweg das Breitengeschäft mit der neuen Technik und trugen maßgeblich zu ihrer ständigen Weiterentwicklung und allmählichen Perfektionierung bei. Andererseits jedoch wiesen die jeweiligen Konstellationen der an der Technikentwicklung beteiligten Akteure deutliche Unterschiede auf, die in der jeweils verschiedenen Bedeutung von Staat und Wissenschaft und des Werkzeugmaschinenbaus lagen. In den USA verlief die NC-Entwicklung hauptsächlich ähnlich wie eine ganze Reihe weiterer, vor allem militärtechnischer Entwicklungen im – während und nach dem Zweiten Weltkrieg gewachsenen – Interessengeflecht von Staat und Militär, den naturwissenschaftlich-technischen Großforschungseinrichtungen und Teilen der elektrotechnischen Industrie. Der Werkzeugmaschinenbau war nur durch wenige Großbetriebe beteiligt, die über enge Kooperationsbeziehungen mit den staatlichen Stellen und wissenschaftlichen Instituten verbunden waren.

15 Wolfgang Schmid, *Automatologie – Grundlagen der Selbststeuerung von Fertigungsmaschinen*, München 1952; Karl Häuser, *Erste Anwendungen numerischer Steuerungen*, in: *Werkstatt und Betrieb* 117, 1984, H. 11, S. 719-721.

Grundlegend für die Entwicklung der amerikanischen NC-Technik war die militärisch beeinflusste Steuerungs- und Rechner-technik auf der Basis spezialisierter und standardisierter Werkzeugmaschinenkonzeptionen für die Serien- und Großserienfertigung wie auch komplexer Großmaschinenkonzepte für die Luft- und Raumfahrtindustrie – so genannte skin mills. Bezugspunkt der Technikentwicklung waren dabei nahezu ausschließlich die erwähnten Fertigungsprobleme der militärischen Luftfahrtindustrie, die weitgehend unabhängig von Kriterien der ökonomischen Effizienz und den Risiken des Marktes die neue Technik einsetzen sollte. Dabei handelte es sich weniger um Probleme der Fertigungstechnologie, wie die Festlegung von Werkzeugen oder von Maschinendrehzahlen und Bearbeitungsgeschwindigkeiten, als vielmehr um Anforderungen an die Fertigung komplexer Teilegeometrien, wie etwa bei der Bearbeitung kompliziert räumlich gekrümmter Flächen. Diese Bedingungen machten die Entwicklung komplexer und aufwändiger Steuerungen, nämlich Bahnsteuerungen, notwendig. Sie mussten in der Lage sein, das Werkzeug einer Profilmaschine entlang einer mehr-dimensional geformten Bahn zu steuern. Die Programmierung dieser Steuerungen war zeitaufwändig und komplex und erforderte daher einen zeitlich und räumlich von der Maschine in der Werkstatt separierten, neuartigen Arbeitsprozess. Darüber hinaus sind aber auch Hinweise unübersehbar, dass mit der NC-Entwicklung auch das Ziel verfolgt wurde, über die leicht mögliche Transferierbarkeit von Datenträgern, Lochstreifen oder Magnetbändern mit Bearbeitungsprogrammen von einem Betrieb zum anderen die Rüstungsproduktion weniger störanfällig zu halten und vor allem in Krisensituationen unabhängig von der Verfügbarkeit über qualifizierete Arbeitskraft gleichsam hochfahren zu können.

Der militärisch-staatliche Einfluss setzte sich über verschiedene vom Department of Defense finanzierte Investitions- und Entwicklungsprogramme durch. Sie richteten sich primär auf die Herstellung der fertigungstechnischen Basis der direkten Auftragnehmer (prime contractors) des Ministeriums, d.h. die Großunternehmen aus der Rüstungsindustrie. Faktisch übte es damit einen direkten und weitreichenden Einfluss auf die gesamte fertigungstechnische Entwicklung aus. Mit den verschiedenen Technologieförderprogrammen des Verteidigungsministeriums wurden nicht nur die NC-Technik, sondern in den 1960er Jahren beispielsweise auch CAD- und CAD/CAM-Techniken¹⁶ gefördert. Ab Mitte der 1970er 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.

16 CAD: Computer Aided Design; CAM: Computer Aided Manufacturing; eine integrierte Datennutzung beider Teilsysteme wurde mit CAD/CAM-Systemen zu realisieren versucht.

In die fertigungstechnische Entwicklung war dabei unmittelbar eine Reihe großer wissenschaftlicher Institute eingebunden, deren Forschungsschwerpunkte grundlegende Arbeiten zur Entwicklung von Informatik, Computer- und Steuerungstechnologien waren. Neben Einrichtungen wie dem Illinois Institute of Technology, Instituten der Perdue University oder verschiedenen Institutionen in Kalifornien spielte insbesondere das MIT mit seinen verschiedenen Laboratorien eine hervorragende Rolle.¹⁷ Diese und weitere wissenschaftliche Einrichtungen 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 1960er Jahren am MIT durchgeführt wurde, zu Stande kam.¹⁸

Die Interessen und Orientierungen der Entwickler in den USA waren daher weitgehend von wissenschaftlich-informationstechnischen Kriterien eines möglichst weitreichenden und perfektionierten Einsatzes von Computertechniken bestimmt, während ökonomische Entwicklungserfordernisse eine nachgeordnete Rolle spielten. Wie Noble¹⁹ zeigt, fanden diese Technikkonzepte ihre Stütze in den spezifischen technisch-administrativen Positions- und Herrschaftsinteressen der an der NC-Entwicklung beteiligten Rechnerspezialisten und Ingenieure. Folgt man ihm weiterhin,²⁰ 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 die automatische Fabrik richteten.

3.2 Bundesrepublik: Vom Werkzeugmaschinenbau bestimmte Entwicklung

Für den im Vergleich zu den USA um einige Jahre zeitversetzten Beginn der NC-Entwicklung in Deutschland war ein relativ enges Netzwerk verschiedener industrieller und nicht-industrieller Entwickler und Hersteller charakteristisch, das sich insbesondere durch eine enge Kooperation zwischen industriellen Entwicklern aus der elektrotechnischen Industrie, dem Werkzeugmaschinenbau und ingenieurwissenschaftlichen Institutionen auszeichnet. Einflussreicher Akteur in diesem Geflecht war der Werkzeugmaschinenbau. Er griff einerseits die vielfältigen und sehr unterschiedlichen Anforderungen

17 Seymour Melman, *Pentagon Capitalism*, New York 1970, S. 261ff.

18 John F. Reintjes, *Numerical Control – Making a New Technology*, New York, Oxford 1991, S. 100ff.

19 Noble, *Forces of Production* (wie Anm. 3), S. 203ff.

20 Ders., *Maschinen gegen Menschen* (wie Anm. 3), S. 28ff.

von Technikanwendern aus den unterschiedlichsten Branchen der Metallbearbeitung auf. Andererseits gingen von ihm vielfältige Initiativen zu fertigungstechnischen Innovationen aus. Dabei dominierten allerdings keineswegs einzelne, etwa größere Betriebe des Werkzeugmaschinenbaus den Entwicklungsprozess. Vielmehr waren daran auf ihren spezifischen technischen Feldern Betriebe sehr unterschiedlicher Größe beteiligt.

Im Verbund zwischen Unternehmen, Hochschulinstituten und außeruniversitären Instituten wird der besondere Charakter der deutschen Entwicklungskonstellation und des damit verbundenen Entwicklungspfades von Fertigungstechnik deutlich: nämlich die von fertigungspraktischen Erfordernissen bestimmte Nutzung von Wissenschaft und Technologie. Es existierten stabile und enge Formen der Zusammenarbeit insbesondere zwischen dem Werkzeugmaschinenbau und den wissenschaftlichen Instituten, an denen sowohl fertigungsorientierte Grundlagenforschung als auch angewandte Forschung betrieben wurde.²¹ Es handelte sich dabei in der Bundesrepublik um eine ganze Reihe von bekannten Universitätsinstituten und Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, die sich mit Maschinenbau bzw. der ingenieurwissenschaftlichen Disziplin Fertigung und Werkzeugmaschinen sowie der Entwicklung von Fertigungstechniken der verschiedensten Art befassten. Während sich in den USA die fertigungstechnische Entwicklung auf wenige Institute mit expliziter Orientierung an Grundlagenforschung konzentrierte, hat sich in der Nachkriegszeit in der Bundesrepublik eine größere Zahl arbeitsteilig und spezialisiert arbeitender Wissenschaftseinrichtungen etabliert.

Wie sich im Verlauf der NC-Entwicklung zeigte, spielten diese Institutionen im Prozess der Technikentwicklung eine doppelte Rolle: Erstens fungierten sie als wichtige Informationsbeschaffer und Informationsvermittler über neue Technologien und ihre Potentiale; auch entwickelten sie gelegentlich erste Entwürfe oder Prototypen neuer fertigungstechnischer Lösungen. Zweitens betrieben die Institute zu größeren Anteilen praktisch orientierte Auftragsforschung, wobei ein beträchtlicher Teil der Aufträge direkt aus Unternehmen kam.²² Hier dürfte die eigentliche Bedeutung dieser wissenschaftlichen Einrichtungen im Prozess der fertigungstechnischen Entwicklung gelegen haben: die gezielte Bereitstellung wissenschaftlich-technologischen Know-hows für innovative Lösungen, die von der Industrie ange-regt und gefordert wurden.

Dieses Netzwerk zwischen den verschiedenen industriellen und wissenschaftlichen Entwicklern wurde stabilisiert durch die vermittelnde Rolle von Verbänden wie dem VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.), dem VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken e.V.)

21 Marc Maurice u. Arndt Sorge, Industrielle Entwicklung und Innovationsfähigkeit der Werkzeugmaschinenhersteller in Frankreich und der Bundesrepublik Deutschland, WZB Discussion Papers No. FS I 90-11, Berlin 1990, S. 27f.

22 Spur (wie Anm. 9), S. 407ff.

und auch dem VDI (Verein Deutscher Ingenieure). Im Unterschied zu den USA boten sie im Rahmen fest etablierter Treffen und Gremien, an denen gleichermaßen Betriebspraktiker wie auch Wissenschaftler teilnahmen, die Möglichkeit eines kontinuierlichen Austauschs von Erfahrungen und Know-how sowie die Herstellung von Kontakten, aus denen dauerhafte Kooperationsbeziehungen hervorgingen. Daneben spielten nicht nur für die Bereitstellung von Know-how und Informationen, sondern insbesondere auch für die Finanzierung kooperativer FuE-Maßnahmen verschiedene Förderinstitutionen, z.B. die zum Teil staatlich finanzierte Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF), eine maßgebliche Rolle.

Insgesamt verlief die NC-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland von Beginn an in hohem Maße marktorientiert. Sie war bestimmt von pragmatisch-fertigungstechnischen Entwicklungskriterien, die auf eine möglichst breite und problemlose Einsetzbarkeit – insbesondere durch eine hohe organisatorische Flexibilität der NC-Technik als Rationalisierungsmittel – ausgerichtet waren. Wie sich ein Experte ausdrückte, orientierte sich die Art des Einstiegs in die NC-Technik in der Bundesrepublik maßgeblich an Kriterien wie Kosten und technischer Zuverlässigkeit, und das Absatzinteresse der westdeutschen Entwickler konzentrierte sich auf die in- und ausländische Metallindustrie mit ihren insgesamt wenig einheitlichen Bearbeitungsanforderungen. Basis der NC-Technik waren Werkzeugmaschinen-Konzepte, die nur teilweise einen komplexen Charakter aufwiesen und die auf einem hohen Anteil von Empirie und praktischer Erfahrung basierten. Zugespielt: Ausgangspunkt der westdeutschen Entwicklung war das Konzept einer Universalwerkzeugmaschine – paradigmatisch hier die Spitzendrehbank im Unterschied zur spezialisierten Revolverdrehbank in den USA.

4. Strukturbedingungen der USA

4.1 Industriestrukturen: High-Tech und Taylorismus

Die verschiedenen Entwicklerkonstellationen standen in enger Wechselwirkung mit ebenso verschiedenen sozio-ökonomischen Strukturbedingungen beider Länder. In den USA ist die Industriestruktur in besonderer Weise von dem ökonomischen Gewicht der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie als Teil der für die US-Industrie insgesamt zentralen „High-Tech“ Bereiche geprägt. Gestützt auf eine traditionell hohe staatliche Förderung, insbesondere bei Rüstungs-, Raumfahrt- und Luftfahrtprogrammen, absorbierten diese Bereiche nicht nur hohe Entwicklungsressourcen,²³ sondern übten auch einen starken Druck auf die fertigungstechnische Entwicklung mit ihren Kriterien der Perfektion und Komplexität aus. Wesentlich hierfür ist, dass diese Industriebereiche weitgehend abgeschottet von Markteinflüssen, insbesondere von

23 Jost Halfmann, Die Entstehung der Mikroelektronik, Frankfurt a.M., New York 1984; Gerd Junne, Das amerikanische Rüstungsprogramm – Ein Substitut für Industriepolitik, in: Leviathan 13, 1985, S. 23-37.

den Konkurrenzbedingungen des Weltmarktes operieren, die eine durchgreifende und kosteneffiziente Rationalisierung der Produktion erzwingen würden. In diese Grundstruktur war die NC-Entwicklung von Anbeginn an eingebunden.

Dieser Situation entsprach über lange Jahre hinweg die ausschließliche Dominanz taylorisierter, zumeist großbetrieblicher Produktionsprozesse mit ausgeprägt arbeitsteiligen Organisationsformen und einer mehrheitlich gering qualifizierten Belegschaft. Dies gilt sowohl für weite Bereiche der Metallverarbeitung als insbesondere auch für die Luftfahrtindustrie, die im Verlauf des Zweiten Weltkrieges eine schnelle und enorme Ausweitung erlebte. Die spätestens seit Beginn der 1950er Jahre mit der Entwicklung neuer Flugzeugtypen aufkommenden besonderen und komplexen Bearbeitungsprobleme konnten daher nicht nur aus technischen, sondern auch aus arbeitsorganisatorischen Gründen, vor allem mit den angelernten Arbeitskräften, kaum bewältigt werden. Das auf die Ausweitung der Eigenfähigkeit technischer Anlagen und der Marginalisierung menschlicher Arbeit zielende NC-Konzept war für derartige Einsatzbedingungen überaus angemessen.

Demgegenüber ging von den weiten Bereichen der zivilen Metallverarbeitung, insbesondere des Maschinenbaus bis in die 1980er Jahre hinein offensichtlich kein vergleichsweise ähnlich hoher Innovationsdruck aus. Die Mehrheit der Betriebe wies nur ein geringes Automatisierungsniveau auf, und die Produktionsprozesse waren keinen sonderlich komplexen technologischen Anforderungen ausgesetzt. Diese Situation resultierte aus dem stabilen Einfluss des großen Inlandsmarktes der USA und einer für einen durchschnittlichen Metallbetrieb in der Regel sehr begrenzten Orientierung am Weltmarkt. Die entsprechenden Produktionsstrukturen waren die der Serien- oder Massenproduktion, die technisch und ökonomisch mit den verschiedenen Formen der konventionellen „Detroit-Automatisierung“ beherrschbar waren. Hinzu kam schließlich die in der amerikanischen Industrie nahezu generell anzutreffende Praxis, wonach gegenüber den Kapitalgebern ein möglichst hoher „quarterly profit“ nachgewiesen werden muss, der längerfristig orientierte, nicht unmittelbar rentable Investitionen in neue Techniken vielfach verhindert. Insgesamt bestand damit über lange Zeit hinweg kaum die Notwendigkeit, aber auch kaum die Möglichkeit einer weitreichenden Neuorientierung von Rationalisierungsstrategien und dem Einsatz neuer Produktionstechniken.

Gestützt wurden diese betriebsstrukturellen Bedingungen durch die spezifischen Bedingungen des US-Arbeitsmarktes. Der Arbeitsmarkt zeichnet sich bis heute durch eine nur sehr begrenzte Verfügbarkeit fachlich qualifizierter und technisch kompetenter Arbeitskräfte für den Fertigungsbereich aus. Von einer Facharbeiterausbildung wie in Deutschland kann bekanntlich nicht gesprochen werden. Qualifizierung und Anlernung fand traditionell nur betriebsbezogen im Rahmen hierarchisch streng gegliederter Mobilitätsketten

statt, die vergleichsweise offene Arbeitsstrukturen mit geringen hierarchischen Abstufungen – eine organisatorische Voraussetzung für Werkstattprogrammierung – nur schwer zugelassen hätten.

4.2 Theoretisch und wissenschaftlich orientiertes FuE-System

Über diese industriestrukturellen Bedingungen hinaus sind die besonderen Einflüsse des Wissenschaftssystems der USA auf die Technikentwicklung hervorzuheben. Wesentlich ist, dass es bis heute keine ausgeprägte praxisbezogene „Maschinenbaukultur“ – so ein interviewter Experte –, wie sie in Deutschland spätestens seit dem Ende des 19. Jahrhunderts existiert, gibt. Deutlich wird diese Situation daran, dass in den USA nur sehr wenige und kaum renommierte produktionstechnische Institute und Lehrstühle zu finden sind. Das die Entwicklung rechnergestützter Fertigungstechniken tragende technische Personal war 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) bei der Entwicklung moderner Fertigungstechniken in den USA eine dominierende Rolle. Diese Gruppen des höheren technischen Personals fanden 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.²⁴ 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. Kennzeichnend ist, dass die Mehrheit dieser Ingenieure und Wissenschaftler von vorneherein versuchte, fertigungsnahe Jobs zu vermeiden. Nicht selten wurde das Desinteresse und die elitäre Haltung von Ingenieuren gegenüber Problemen der Werkstatt beklagt. Der Aufstieg ins Management oder in separate FuE-Bereiche und wissenschaftliche Institutionen war vorherrschende Karriereorientierung, wobei ein längeres Verweilen in fertigungsnahen Bereichen als eher hinderlich für eine solche Karriere galt. Der Status von Fertigungsingenieuren und Technikern ist gering, in wissenschaftlichen wie auch industriellen Bereichen trugen sie das „Stigma“, nur wenig gebildet zu sein.²⁵ Generell war daher in den

24 Robert Perucci, Engineering – Professional Servant of Power, in: American Behavioral Scientist 14, 1971, S. 492-506.

25 Artemis March et al., The US Machine Tool Industry and its Foreign Competitors. Working Papers of the MIT Commission on Industrial Productivity, Bd. 2, Cambridge, London 1989, S. 27; OTA (United States Congress, Office of Technology Assessment), Making Things Better – Competing in Manufacturing, OTA.ITE-443, Washington D.C., February 1990, S. 25.

USA von einer starken und deutlichen Trennung zwischen praktischer Technikanwendung und wissenschaftlich-theoretisch orientierter Technikentwicklung auszugehen. Produktionstechnische Probleme wurden sehr schnell unter dem Blickwinkel der Computerwissenschaft und Informatik perzipiert und mit den entsprechenden Instrumenten und Methoden angegangen. Grundlage dieser Situation war die sehr große Bedeutung der Informatik im Wissenschaftssystem und ihre enge personelle Verknüpfung mit der Computer- und Rüstungsindustrie.²⁶

Entscheidend für die amerikanische Situation war dabei die skizzierte finanzielle Unterstützung der Entwicklungsvorhaben durch das Militär. Erst sie eröffnete den Spielraum für die professionellen Interessen der Entwicklungsingenieure und Informatiker, die nie etwas mit den praktischen Erfordernissen 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 demgegenüber John T. Parsons die Technologieprogramme der Air Force, die sich ohne Rücksicht auf Kriterien der Wirtschaftlichkeit einzig an Anforderungen technischer Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit orientierten, als „a monstrous technological boondoggle“.

Die Interessen der theoretisch ausgebildeten Ingenieure und Wissenschaftler korrespondierten zudem mit den Bestandsinteressen der großen Forschungsinstitute. Sie zielten auf eine kontinuierliche Nutzung und Ausweitung der Laboranlagen und des akkumulierten Know-hows, worüber Forschungsprioritäten und neue Forschungsfelder definiert wurden; „Forschungsziele lassen sich mit bestimmten Dimensionierungen der benötigten Apparate gleichsetzen.“²⁷ 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 auf Grund industriell- oder marktbezogener Entwicklungskriterien strukturverändernde Umstellungs- und Anpassungsmaßnahmen erforderlich gemacht hätte. Die gleichgerichteten, aber von der Fertigungspraxis abgehobenen Interessen machen es plausibel, dass allgemeine Theorien

26 Rolf Kreibich, Die Wissenschaftsgesellschaft – Von Galilei zur High-Tech-Revolution, Frankfurt a.M. 1986, S. 346ff.

27 Ulrich Rödel, Forschungsprioritäten und technologische Entwicklung, Frankfurt a.M. 1972, S. 125.

der Informationsverarbeitung und mathematisch abgeleitete Modelle von Produktionsprozessen und im militärischen Zusammenhang entwickelte Regelungs- und Steuerungstechnologien als Lösungspotentiale für Fertigungsprobleme herangezogen wurden. Zielsetzung wurde ihre konsequente „Elektronisierung“, die Substituierung personell auszuführender Steuerungs- und Überwachungsarbeit durch mathematisierte Prozessmodelle, die Simulation produktionsstechnischer Zusammenhänge und die Automation der realen Abläufe.²⁸

Politisch-institutionelle Voraussetzung hierfür war ein staatliches gestütztes FuE-System, das sich auf die Förderung von großen Projekten mit spezifischen und weitreichenden High-Tech-Innovationen richtete; 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.²⁹ Folgt man der vorliegenden Literatur,³⁰ 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 waren und sind,³¹ weist diese wissenschaftlich-militärische Innovationsstruktur einen ausgeprägten Netzwerkcharakter mit dichten, politisch-administrativ vermittelten Kooperationsbeziehungen der beteiligten Akteure auf.³²

5. Bundesrepublik: Heterogene Industriestruktur und praxisorientiertes FuE-System

Die teilweise völlig davon abweichenden sozio-ökonomischen Bedingungen der NC-Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland liegen auf der Hand: In der vergleichsweise vielfältigeren deutschen Industriestruktur kommt der Investitionsgüterindustrie traditionell eine hohe ökonomische Bedeutung zu, wobei der Maschinenbau als nach Umsatz und Beschäftigung größter Industriebranche eine Schlüsselrolle hatte. Auf Grund dieses Umstandes war der Maschinenbau nicht nur Produzent, sondern zugleich auch größter An-

28 Halfmann (wie Anm. 23).

29 Nicholas J. Ziegler, *Retooling the Industrial Plant*, Diss., MIT, Cambridge/Mass. 1989.

30 Rödel (wie Anm. 27); Halfmann (wie Anm. 23), S. 50ff.; Kreibich (wie Anm. 26), S. 333ff.

31 Gründe für diese Situation liegen unter anderem im weitgehenden Verbot jeglicher Form von Interessenabsprachen zwischen Betrieben durch die Anti-Trust-Gesetzgebung der USA, die auch schon „lockere Verbindungen“ zwischen Betrieben bis in die jüngste Zeit nahezu unmöglich machte. Erst 1984 wurden diese Regelungen in Folge der Anforderungen des SDI-Forschungsprogramms an kooperative Entwicklungsprozesse durch den „National Cooperative Research Act“ gelockert.

32 Roger J. Hollingsworth, *Die Logik der Koordination des verarbeitenden Gewerbes in Amerika*, in: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 43, 1991, H. 3, S. 18-43.

wender von Produktionsmitteln. Dabei stellt der Maschinenbau insgesamt bekanntermaßen ein überaus heterogenes Anwendungsfeld für Fertigungstechniken dar, und von ihm geht auf Grund der vorherrschenden kundenspezifischen Einzel- bis Kleinserienfertigung und seiner hohen Weltmarktverflechtung ein permanenter Innovationsdruck auf flexible Formen der Technisierung aus. Als besonderes Merkmal dieser Branche gilt daher auch seit jeher ihr „Rationalisierungsdilemma“, nämlich der nur schwer bewältigbare Gegensatz zwischen den Anforderungen nach Ökonomisierung und Flexibilisierung der Produktion.

Damit in Zusammenhang steht, dass insbesondere im Maschinenbau mittel- bis kleinbetriebliche Strukturen mit einer nur wenig ausgeprägten betrieblichen Arbeitsteilung und einem Einsatz zumeist qualifizierter Facharbeiter vorherrschten. Existierende Büros der Arbeitsvorbereitung verfügten vielfach faktisch nur über begrenzte Planungskompetenzen für die Fertigung. Obgleich bis weit in die 1980er Jahre hinein dem Leitbild der Taylorisierung verpflichtet, führte die Rationalisierung im Maschinenbau wie generell in der deutschen Industrie nicht zu einer so durchgreifenden Entleerung und Marginalisierung von Produktionsarbeit, wie sie in vielen Industriebranchen der USA anzutreffen war.

Dies impliziert, dass Werkzeugmaschinen generell, wie aber auch NC-Maschinen in besonderer Weise, für die häufig nur unzulänglich im voraus kalkulierbaren Fertigungsbedingungen dieser Branche in Form einer hohen technisch-organisatorischen Flexibilität – u. a. durch direkte Programmiermöglichkeiten – ausgelegt sein mussten. Hinzu kommt, dass traditionell ein hoher Anteil der bundesdeutschen Werkzeugmaschinenproduktion exportiert wurde, so dass die sehr vielfältigen Anforderungen des Weltmarktes gleichfalls unmittelbar auf die NC-Entwicklung durchschlugen. Dagegen spielte in der Bundesrepublik Deutschland die Luftfahrt- und Rüstungsindustrie mit ihren spezifischen, vom allgemeinen Maschinenbau abweichenden Fertigungsbedingungen eine insgesamt nachgeordnete Rolle, mit der sich offensichtlich kein nennenswerter Einfluss auf die fertigungstechnische Entwicklung verband. Nicht zufällig fanden sich in Betrieben der Luftfahrt- und Rüstungsindustrie der Bundesrepublik nach amerikanischem Vorbild konzipierte oder aus den USA übernommene fertigungstechnische Systeme und Anlagen.

Obwohl vergleichsweise flexibel, waren die dominanten westdeutschen NC-Konzepte mit ihrer prinzipiell zentralen Programmierung für dieses Anwendungsfeld vielfach zu starr und zu aufwändig, wohingegen der werkstattorientierte Pfad der NC-Entwicklung das ohne Frage geeignetere Rationalisierungsmittel darstellte. Dies erwies sich insbesondere ab Mitte der 1970er Jahre, als krisenbedingt das Rationalisierungsdilemma des Maschinenbaus an Schärfe gewann und die Verbreitung von NC-Maschinen geradezu sprunghaft anzusteigen begann, da allein mit dieser Technik die widersprüchlichen Rationalisierungsanforderungen ein Stück weit bewältigt werden konnten.

Die damit einhergehende Flexibilisierung der Produktionsprozesse konnte unter diesen Voraussetzungen produktionstechnisch vergleichsweise elastisch aufgefangen und zu den damaligen internationalen Verkaufserfolgen bundesdeutscher NC-Maschinen genutzt werden.

In Wechselwirkung zu den skizzierten industriestrukturellen Bedingungen stehen die Besonderheiten des deutschen Systems beruflicher Bildung, das auf Grund der engen Verflechtung von schulischer und berufspraktischer Ausbildung in Betrieben in der Lage war, Arbeitskräfte vergleichsweise hoher Qualifikation auszubilden, die zudem in hinreichend großer Zahl dem Arbeitsmarkt zur Verfügung gestellt werden konnten. Diese hohe Verfügbarkeit über qualifizierte Produktionsarbeiter in Deutschland war eine der wesentlichen Voraussetzungen für die dauerhafte Existenz relativ wenig taylorisierter Arbeitsprozesse, die ihrerseits ein zentraler Bezugspunkt des werkstatorientierten NC-Pfades geworden sind.

Diese enge Verflechtung der Technikentwicklung mit vielfältigen Anwendungsbedingungen setzte sich im System produktionstechnischer Wissenschaften fort. Der relativ enge Praxisbezug manifestierte sich nicht nur in den Besonderheiten des deutschen Ingenieurstudiums, das in hohem Maße auf die Vermittlung praktischen Handlungswissens abstellt,³³ sondern er basierte vor allem auf einer engen personellen Verflechtung zwischen dem Wissenschaftssystem und den fertigungstechnischen Betrieben. Hier spielten beispielsweise Karrieremuster von Ingenieurwissenschaftlern, die in der Regel nur über Betriebe verlaufen, sowie eine von den Betrieben bestimmte, fachliche Kooperation zwischen Wissenschaft und Unternehmen eine entscheidende Rolle.

Politisch-institutionelle Voraussetzung für die enge Verschränkung industrieller und wissenschaftlicher Akteure bei der Technikentwicklung war eine Form staatlicher FuE-Politik, die politikwissenschaftlich als „diffusionsorientiert“ gefasst wird.³⁴ 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-Einrichtungen zielten. Konkret bedeutete dies, dass staatliche FuE-Politik in Deutschland hauptsächlich auf die Komplementarität zur industriellen For-

33 Burkart Lutz u. Pierre Veltz, Maschinenbauer versus Informatiker – Gesellschaftliche Einflüsse auf die fertigungstechnische Entwicklung in Deutschland und Frankreich, in: Klaus Düll u. Burkart Lutz (Hg.): Technikentwicklung und Arbeitsteilung im internationalen Vergleich, Frankfurt a.M., New York 1989, S. 213-285.

34 Alexander Gerybadze u. Arthur D. Little, International, Raumfahrt und Verteidigung als Industriepolitik? Frankfurt a.M., New York 1988; Ziegler (wie Anm. 29).

schung setzte. Auf Grund 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.

6. Entwicklungspfade und Innovationssysteme

Die Dynamik und die Richtung fertigungstechnischer Entwicklung hängen davon ab, in welcher Weise technologische Entwicklungspotentiale 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, wie die NC-Entwicklung zeigt, für je verschiedene Entwicklungspfade innerhalb ein und derselben Techniklinie. 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 Potentiale von Wissenschaft und Technologie teilweise sehr unterschiedlich mit den Anforderungen der industriellen Praxis abgestimmt wurden.

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“ industrieller Rationalisierung – repräsentiert. 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.“³⁵

Wie gezeigt, ist der jeweilige Verlauf fertigungstechnischer Entwicklungspfade 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 davon auszugehen, dass Nationen unterscheidbare ökonomische

35 Horst Kern, Über die Gefahr, das Allgemeine im Besonderen zu sehr zu verallgemeinern, in: Soziale Welt 32, 1989, H. 1/2, S. 259-268.

misch-politische Formationen darstellen und sich die Durchsetzung ökonomischer und technologischer Prinzipien an ihren je spezifischen normativen, politischen, institutionellen und sozialstrukturellen Bedingungen bricht; es kann von länderspezifisch unterscheidbaren Produktions- und Innovationssystemen gesprochen werden.³⁶

Folgt man den skizzierten Befunden über die verschiedenen Entwicklungspfade der NC-Technik, so können folgende Elemente als zentrale Merkmale nationalspezifisch unterschiedlicher Innovationssysteme angesehen werden:

- Der Anwendungsbezug fertigungstechnischer Entwicklung: bestimmte, sich besonders durchsetzende Anwenderinteressen und Anwenderprobleme. Dieser Anwendungsbezug steht seinerseits in engem Zusammenhang mit den je gegebenen, nationalspezifischen Industriestrukturen, ihren charakteristischen markt- und produktionsökonomischen Faktoren und ihren Wandlungsprozessen im Zuge sozio-ökonomischer Entwicklung.
- Der Kreislauf zwischen Entwicklung, Anwendung und Weiterentwicklung: entscheidend für seinen Verlauf sind die je gegebenen Entwickler- bzw. Hersteller-Anwender-Beziehungen. 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. Von Wichtigkeit sind hier vor allem die länderspezifisch unterschiedlichen Interaktionsmuster zwischen den verschiedenen korporativen, kollektiven und auch individuellen Akteuren, die marktförmig, hierarchisch oder kooperativ bzw. netzwerkförmig sein können und damit jeweils verschiedene Konsequenzen für den Verlauf von Innovationsprozessen haben können. Wie gezeigt, verliefen die fertigungstechnischen Entwicklungsprozesse in den USA im Kontext eher hierarchisch koordinierter FuE-Systeme, während in Deutschland von kooperativ-netzwerkförmigen Entwicklungsstrukturen gesprochen werden kann.
- Das technische Personal: 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, die es mit der Entwicklung verbindet. Die jeweilige Zusammensetzung des technischen Personals verweist auf seine gesellschaftlichen Reproduktionsmuster, auf das jeweili-

36 Vgl. hierzu das innovationsökonomische Konzept der „Nationalen Innovationssysteme“, das im Kontext international vergleichender Analysen technologischer und wirtschaftlicher Entwicklung verschiedener Staaten eine institutionentheoretisch begründete Analyse unterschiedlicher Entwicklungspfade liefert; insbesondere: Bengt-Ake Lundvall (Hg.), *National Innovation Systems*, New York 1992; Jerald Hage u. Roger J. Hollingsworth, *A Strategy for the Analysis of Idea Innovation Networks and Institutions*, in: *Organization Studies* 21, 2000, H. 5, S. 971–1004.

ge gesellschaftliche System von Forschung und Entwicklung und insbesondere die damit verbundene historische Bedeutung und das wissenschaftlich-akademische Gewicht der Ingenieurwissenschaften. Die Ausprägung und das Zusammenspiel dieser Einflussgrößen konstituieren ein je spezifisches Verhältnis zwischen den verfügbaren und grundsätzlich nutzbaren fertigungstechnischen Entwicklungspotentialen und den Anforderungen industrieller Praxis mit dem Resultat eines bestimmten Entwicklungspfades von Fertigungstechnik.

Wie an der Geschichte der NC-Entwicklung deutlich wird, kann die Nutzung gleicher technologischer Potentiale zur Technisierung ähnlicher und von ihren Grundstrukturen her vergleichbarer, nämlich metallbearbeitender Produktionsprozesse in institutionell und strukturell unterschiedlichen Zusammenhängen zu verschiedenen technischen Entwicklungspfaden führen. Gewiss können sich Innovationssysteme im historischen Ablauf verändern und technische Entwicklungspfade sich verschieben – dies insbesondere im Zuge wachsender internationaler FuE-Verflechtungen –, doch zeigen sie grosso modo über bestimmte historische Phasen hinweg gewisse einheitliche Muster, die aus einem hohen institutionellen Beharrungsvermögen und festgefügt Interessenlagen der beteiligten Akteure resultieren.

Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Hartmut Hirsch-Kreinsen, Lehrstuhl Wirtschafts- und Industriesoziologie, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät, Universität Dortmund, D-44221 Dortmund, E-mail: h.hirschkreinsen@wiso.uni-dortmund.de.