

Sonderdruck aus:

Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung

Peter Brödner und Friedrich Hamke

Automatisierung und Arbeitsplatzstrukturen

3. Jg./1970

2

Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (MittAB)

Die MittAB verstehen sich als Forum der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung. Es werden Arbeiten aus all den Wissenschaftsdisziplinen veröffentlicht, die sich mit den Themen Arbeit, Arbeitsmarkt, Beruf und Qualifikation befassen. Die Veröffentlichungen in dieser Zeitschrift sollen methodisch, theoretisch und insbesondere auch empirisch zum Erkenntnisgewinn sowie zur Beratung von Öffentlichkeit und Politik beitragen. Etwa einmal jährlich erscheint ein „Schwerpunktheft“, bei dem Herausgeber und Redaktion zu einem ausgewählten Themenbereich gezielt Beiträge akquirieren.

Hinweise für Autorinnen und Autoren

Das Manuskript ist in dreifacher Ausfertigung an die federführende Herausgeberin Frau Prof. Jutta Allmendinger, Ph. D. Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung 90478 Nürnberg, Regensburger Straße 104 zu senden.

Die Manuskripte können in deutscher oder englischer Sprache eingereicht werden, sie werden durch mindestens zwei Referees begutachtet und dürfen nicht bereits an anderer Stelle veröffentlicht oder zur Veröffentlichung vorgesehen sein.

Autorenhinweise und Angaben zur formalen Gestaltung der Manuskripte können im Internet abgerufen werden unter http://doku.iab.de/mittab/hinweise_mittab.pdf. Im IAB kann ein entsprechendes Merkblatt angefordert werden (Tel.: 09 11/1 79 30 23, Fax: 09 11/1 79 59 99; E-Mail: ursula.wagner@iab.de).

Herausgeber

Jutta Allmendinger, Ph. D., Direktorin des IAB, Professorin für Soziologie, München (federführende Herausgeberin)
Dr. Friedrich Buttler, Professor, International Labour Office, Regionaldirektor für Europa und Zentralasien, Genf, ehem. Direktor des IAB
Dr. Wolfgang Franz, Professor für Volkswirtschaftslehre, Mannheim
Dr. Knut Gerlach, Professor für Politische Wirtschaftslehre und Arbeitsökonomie, Hannover
Florian Gerster, Vorstandsvorsitzender der Bundesanstalt für Arbeit
Dr. Christof Helberger, Professor für Volkswirtschaftslehre, TU Berlin
Dr. Reinhard Hujer, Professor für Statistik und Ökonometrie (Empirische Wirtschaftsforschung), Frankfurt/M.
Dr. Gerhard Kleinhenz, Professor für Volkswirtschaftslehre, Passau
Bernhard Jagoda, Präsident a.D. der Bundesanstalt für Arbeit
Dr. Dieter Sadowski, Professor für Betriebswirtschaftslehre, Trier

Begründer und frühere Mitherausgeber

Prof. Dr. Dieter Mertens, Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karl Martin Bolte, Dr. Hans Büttner, Prof. Dr. Dr. Theodor Ellinger, Heinrich Franke, Prof. Dr. Harald Gerfin,
Prof. Dr. Hans Kettner, Prof. Dr. Karl-August Schäffer, Dr. h.c. Josef Stingl

Redaktion

Ulrike Kress, Gerd Peters, Ursula Wagner, in: Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesanstalt für Arbeit (IAB), 90478 Nürnberg, Regensburger Str. 104, Telefon (09 11) 1 79 30 19, E-Mail: ulrike.kress@iab.de; (09 11) 1 79 30 16, E-Mail: gerd.peters@iab.de; (09 11) 1 79 30 23, E-Mail: ursula.wagner@iab.de; Telefax (09 11) 1 79 59 99.

Rechte

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Redaktion und unter genauer Quellenangabe gestattet. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme, Mikrofotos u.ä. von den Zeitschriftenheften, von einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen.

Herstellung

Satz und Druck: Tümmels Buchdruckerei und Verlag GmbH, Gundelfinger Straße 20, 90451 Nürnberg

Verlag

W. Kohlhammer GmbH, Postanschrift: 70549 Stuttgart; Lieferanschrift: Heßbrühlstraße 69, 70565 Stuttgart; Telefon 07 11/78 63-0; Telefax 07 11/78 63-84 30; E-Mail: waltraud.metzger@kohlhammer.de, Postscheckkonto Stuttgart 163 30. Girokonto Städtische Girokasse Stuttgart 2 022 309. ISSN 0340-3254

Bezugsbedingungen

Die „Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung“ erscheinen viermal jährlich. Bezugspreis: Jahresabonnement 52,- € inklusive Versandkosten; Einzelheft 14,- € zuzüglich Versandkosten. Für Studenten, Wehr- und Ersatzdienstleistende wird der Preis um 20 % ermäßigt. Bestellungen durch den Buchhandel oder direkt beim Verlag. Abbestellungen sind nur bis 3 Monate vor Jahresende möglich.

Zitierweise:

MittAB = „Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung“ (ab 1970)
Mitt(IAB) = „Mitteilungen“ (1968 und 1969)
In den Jahren 1968 und 1969 erschienen die „Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung“ unter dem Titel „Mitteilungen“, herausgegeben vom Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesanstalt für Arbeit.

Internet: <http://www.iab.de>

Automatisierung und Arbeitsplatzstrukturen

Bericht über eine Prognose der mutmaßlichen Entwicklung in der Einzel- und Kleinserienfertigung

Peter Brödner und Friedrich Hamke *

Die vorliegende Arbeit ist der leicht gekürzte 2. Teil eines Forschungsberichtes, der im Auftrage der Bundesanstalt für Arbeit auf Anregung des Instituts für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung am Institut für Produktionstechnische Automatisierung der Technischen Universität Berlin, Prof. Dr.-Ing. W. Simon, erarbeitet wurde.

Aufbauend auf den Methoden und Ergebnissen des 1. Untersuchungsabschnittes werden wesentliche Einflußgrößen untersucht, die das Vordringen höher automatisierter Fertigungssysteme, insbesondere der numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen (NC-Maschinen), erklären. Dazu gehören die Wirtschaftlichkeit und der Investitionsaufwand für die Fertigungssysteme unterschiedlichen Automatisierungsgrades, allgemeine Umstellungsschwierigkeiten und Lernprozesse mit zunehmender Verbreitung höher automatisierter Fertigungssysteme sowie allgemeine Entwicklungsrichtungen auf dem Gebiet der Fertigungstechnik, die als Randbedingungen für die besondere Entwicklung in der Einzel- und Kleinserienfertigung betrachtet werden. Die einzelnen Einflußgrößen werden in einem mathematischen Modell miteinander verknüpft, das die bisher zu beobachtende quantitative Verbreitung der NC-Maschinen beschreibt und damit die Grundlage einer Prognose für die mutmaßliche weitere Verbreitung bildet. Aufgrund der Zuordnung von bestimmten Arbeitsplatzstrukturen zu einzelnen Fertigungssystemen unterschiedlichen Automatisierungsgrades wird damit eine Prognose der Anforderungen an einzelnen Arbeitsplätzen zukünftiger Arbeitsplatzstrukturen und des mutmaßlichen Bedarfs an entsprechend qualifizierten Arbeitskräften gegeben.

Gliederung

1. Aufgabenstellung
2. Analyse der Wirtschaftlichkeit von höher automatisierten Fertigungssystemen
 - 2.1 Wirtschaftlichkeit und Produktivität
 - 2.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich auf der Grundlage der Kostenrechnung
 - 2.3 Bewertungsmöglichkeiten von Fertigungssystemen durch Verfahren der Investitionsrechnung
 - 2.4 Lösungsmöglichkeiten des Wirtschaftlichkeitsproblems im Rahmen der systemtheoretischen Strukturbilder
 - 2.4.1 Darstellung der Kostenstrukturen durch Verrechnungssätze
 - 2.4.2 Einfluß betriebsindividueller Daten auf allgemeingültige Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Fertigungssystemen
 - 2.4.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse durch Kostenvergleiche auf der Grundlage einer Verrechnungssatzrechnung
 - 2.4.4 Bewertung der Übergänge zu höheren Automatisierungsstufen durch die Veränderung der Rentabilität
 - 2.5 Investitionsausgaben für höher automatisierte Werkzeugmaschinen
 - 2.6 Kosteneinsparungen bei höher automatisierten Fertigungssystemen
3. Analyse der Investitionsprogramme bei veränderlicher Fertigungsstruktur
 - 3.1 Optimale Investitionsprogramme bei technischem Wandel
 - 3.2 Veränderung der Investitionsprogramme der untersuchten Betriebe
 - 3.3 Bedeutung für prognostische Überlegungen
4. Allgemeine technologische Entwicklungstrends im Bereich der Fertigungstechnik
 - 4.1 Veränderungen auf dem Gebiet der Werkstoffe
 - 4.2 Veränderungen auf dem Gebiet der Fertigungsverfahren
 - 4.3 Veränderungen auf dem Gebiet der NC-Technik
5. Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen
 - 5.1 Übersicht über die Möglichkeiten der Prognose auf der Grundlage systemtheoretischer Strukturbilder
 - 5.2 Analyse der empirischen Daten
 - 5.3 Mathematisches Modell der Verbreitung von NC-Maschinen
 - 5.3.1 Formulierung des Modells
 - 5.3.2 Anpassung der Modellparameter an empirische Daten
 - 5.4 Quantitative Prognose der mutmaßlichen Verbreitung von NC-Maschinen
 - 5.4.1 Verbreitung in einzelnen Betrieben der Untersuchung
 - 5.4.2 Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland

* Peter Brödner und Friedrich Hamke sind als Diplom-Ingenieure Mitarbeiter am Lehrstuhl für Automatisierung und am Institut für Produktionstechnische Automatisierung der Technischen Universität Berlin, 1 Berlin 15, Kurfürstendamm 195-196.

- 5.5 Zusammenfassung der prognostischen Betrachtungen
- 6. Arbeitsplatzstrukturveränderungen aufgrund des Vordringens höher automatisierter Fertigungssysteme
 - 6.1 Allgemeine Folgerungen für die Arbeitsplatzstrukturen
 - 6.2 Charakteristische Veränderungen der Struktur und Qualifikation von Arbeitsplätzen
 - 6.3 Folgerungen für den personellen Bedarf
- 7. Literaturverzeichnis

1. Aufgabenstellung

Im vorangegangenen Bericht über den ersten Untersuchungsabschnitt [1, 2] wurden die theoretischen Ansätze und Methoden als Grundlage empirischer Untersuchungen der Automatisierung in der Einzel- und Kleinserienfertigung erläutert. Wichtigstes Element dieser Methoden war die systemtechnische Analyse von Fertigungssystemen und deren quantitative Beschreibung durch den Automatisierungsgrad, die Wirtschaftlichkeit und die Arbeitsplatzstruktur kennzeichnende Zahlenwerte (vgl. auch [3]). Auf dieser Grundlage konnten im Laufe der praktischen Betriebsuntersuchungen in 10 Betrieben des deutschen Maschinenbaus eine Fülle von Daten gesammelt werden, aus denen sich erste wichtige Ergebnisse wie z. B. die Häufigkeitsverteilung von Fertigungssystemen unterschiedlichen Automatisierungsgrades bestimmen ließen. Während der empirische Nachweis der Wirtschaftlichkeit vor allem der höher automatisierten Fertigungssysteme große Schwierigkeiten bereitete und daher noch ungelöst blieb, konnten für die zugehörigen Arbeitsplatzstrukturen und deren Zuordnung zu den Fertigungssystemen in erster Näherung befriedigende Daten und Erfahrungen gesammelt werden. In Fortführung dieser Untersuchungen stellte sich für den 2. Untersuchungsabschnitt die Aufgabe, neben der Ergänzung der gesammelten und ausgewerteten empirischen Daten schwerpunktmäßig eine Prognose der mutmaßlichen künftigen Entwicklung der Automatisierung in der Einzel- und Kleinserienfertigung zu erarbeiten und dazu ein quantitatives Prognosemodell zu entwickeln. Im einzelnen sollten die Arbeiten in folgenden Schritten weitergeführt werden [1]:

1. Vertiefte Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit und deren Ermittlungsmöglichkeiten;
2. Prüfung bisher bekanntgewordener Prognosemethoden auf ihre Eignung für die Vorausschau der technologischen Entwicklung im Bereich der Stückgutproduktion bei kleinen Losgrößen;

3. Zusammenstellung aller wichtigen Variablen für den Aufbau eines diesbezüglichen Prognosemodells;
4. Überprüfung des erarbeiteten Prognosemodells an der vergangenen Entwicklung und Abschätzung seiner Leistungsfähigkeit.

2. Analyse der Wirtschaftlichkeit von höher automatisierten Fertigungssystemen

Die Wirtschaftlichkeitsanalyse von Werkzeugmaschinen unterschiedlicher Automatisierungsstufen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine Prognose der Arbeitsplatz-Strukturveränderungen, die mit dem Einsatz neuzeitlicher und technisch bereits realisierbarer zukünftiger Produktionsmittel verbunden sind, denn die Verbreitung dieser meist höher automatisierten Produktionsmittel hängt stark von der Erhöhung der Wirtschaftlichkeit ab, die ihren Einsatz gegenüber den bisherigen oder gegenüber alternativen Fertigungsverfahren bewirkt. Da in diesem Zusammenhang häufig auch von der Produktivität anstatt von der Wirtschaftlichkeit gesprochen wird, soll kurz auf beide Begriffe eingegangen werden.

2.1 Wirtschaftlichkeit und Produktivität

Die Wirtschaftlichkeit ist eine Erfolgsmeßzahl, an der das Streben nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip (auch Rationalprinzip, ökonomisches Prinzip genannt) beurteilt werden kann. Unabhängig vom Wirtschaftssystem kann als Wirtschaftlichkeit das Verhältnis von Leistung als Ergebnis der betrieblichen Tätigkeit und Kosten als den dazu notwendigen Güter- und Dienstleistungsverzehr definiert werden [4].

über die Bewertung in Geldeinheiten sind Leistung und Kosten vergleichbar.

$$\text{Wirtschaftlichkeit} = \frac{\text{Leistung (DM)}}{\text{Kosten (DM)}} \quad (2.1)$$

Vielfach wird im technischen Bereich die Produktivität als Beurteilungsmaßstab der Fertigungssysteme verwendet. Die Produktivität — man bezeichnet sie auch als mengenmäßige oder technische Wirtschaftlichkeit — ist das Verhältnis von mengenmäßiger Leistung zum mengenmäßigen Einsatz der Produktionsfaktoren [5]. Sie ist damit ein Maß für die Ergiebigkeit der betrieblichen Faktorkombination. Oft werden auch nur Teilproduktivitäten, z. B. die Arbeitsproduktivität (pro Mann bzw. Arbeitsstunden) oder die Kapitalproduktivität (pro DM eingesetztes Kapital), errechnet. Da aber die Substitution von Arbeit durch Kapital Kennzeichen jeder Automatisierung ist, kann eine Teilproduktivität nicht als einheitliches Bewertungskriterium dienen. Abgesehen davon, daß sich für eine

Gesamtproduktivität keine Kennzahlen aufstellen lassen, wenn die einzelnen Produktionsfaktoren nicht durch die gleiche Recheneinheit normiert worden sind, können ohne ihre Bewertung in Geldeinheiten auch keine Aussagen über die Beachtung des Rationalprinzips gemacht werden [5]. Da aber Investitionsentscheidungen nach diesem Prinzip aufgrund von Bewertungen in Geldeinheiten erfolgen, ist die Produktivität als Bewertungsmaß für den Einsatz von Produktionsmitteln allein nicht geeignet. Die Produktivität ist aber eine wichtige Größe zur Abschätzung des zukünftigen Arbeitskräftebedarfs, denn bei steigender Arbeitsproduktivität geht der Bedarf an Arbeitskräften im Verhältnis zur erzeugten Produktion zurück.

Die Wirtschaftlichkeit als das Verhältnis von Leistung zu Kosten ist ebenfalls als alleiniges Investitionskriterium unzureichend. Wenn z. B. ein neueres Produktionsverfahren wirtschaftlicher ist als das bisherige, so wird man sich nur dann zur Umstellung auf das neue Verfahren entschließen, wenn die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens so groß ist, daß der Einsatz zusätzlicher finanzieller Mittel gerechtfertigt ist. Daher sollen die Investitionsausgaben neben der Wirtschaftlichkeit die Grundlage für die Prognose der Verbreitung höher automatisierter Fertigungssysteme sein.

2.2 Wirtschaftlichkeitsvergleich auf der Grundlage der Kostenrechnung

Die Wirtschaftlichkeit W wurde eingangs als das Verhältnis von in DM bewerteten Leistungen L und Kosten K definiert. Eine Bewertung der Leistung kann vermieden werden, wenn von einer Fertigung gleicher Werkstücke auf den alternativen Maschinen ausgegangen wird, denn in diesem Fall ist die bewertete Leistung der mengenmäßigen proportional. Für die Leistung als eine zeitbezogene Größe legt man zweckmäßigerweise den Ausstoß pro Stunde zugrunde, um dann als Kosten den allgemein auf eine Stunde bezogenen Verrechnungssatz einer Kostenstelle, z. B. den Maschinenstundensatz, verwenden zu können.

Die Wirtschaftlichkeit zweier Anlagen verhält sich dann:

$$w = \frac{W_1}{W_2} = \frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{K_2}{K_1} \quad (2.2)$$

Da die stündlichen Leistungen bei gleichen Aufgaben sich umgekehrt proportional den Fertigungszeiten verhalten, ist

$$w = \frac{L_1}{L_2} = \frac{t_2}{t_1} \cdot \frac{K_2}{K_1} \quad (2.3)$$

Durch den Zeitvergleich bei der Fertigung auf alternativen Anlagen, deren Stundensätze in die

Rechnung einbezogen werden, kann aber nur dann ein Verfahrensvergleich erfolgen, wenn aus der Sicht des Gesamtbetriebes nur die direkt an der Maschine anfallenden Kosten den Wirtschaftlichkeitsvergleich beeinflussen.

Ein Wirtschaftlichkeitsvergleich, allein auf die Werkzeugmaschine bezogen, wird jedoch meist ein falsches Bild ergeben. Im Falle von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen würden z. B. die Kosten der Programmierung bei der NC-Maschine nicht berücksichtigt werden, obgleich sie zusammen mit den zusätzlichen Kapitalkosten die wesentlichen Kosten darstellen, die den Einsparungen durch die Verkürzung der Fertigungszeiten pro Stück gegenüberstehen. Es liegt daher nahe, den Wirtschaftlichkeitsvergleich auf die Erstellung eines Stückes zu beziehen. Leistung und Kosten pro Systemstufe müßten dann auf die Durchlaufzeit pro Stück bezogen sein. Es muß also die Summe der Durchlaufzeiten pro Kostenstelle für ein Stück berechnet werden, d. h. die Programmierzeiten z. B. müssen auf die Gesamtstückzahl umgelegt werden.

Die Leistungen zweier Fertigungssysteme in bezug auf ein bestimmtes Werkstück mit einer vorgegebenen Gesamtfertigungsstückzahl und einer vorgegebenen Losgröße ist dann umgekehrt proportional den Durchlaufzeiten.

Die Gesamtdurchlaufzeiten sind sicher für die Beurteilung von Fertigungssystemen eine wichtige Größe, besonders wenn auch die Transport- und Wartezeiten berücksichtigt werden, denn durch die Verringerung der Durchlaufzeiten ist eine Reduzierung des Umlaufvermögens möglich und die Lieferbereitschaft wird verbessert. Sie kann aber nicht als „Leistung“ in die Berechnung der Wirtschaftlichkeit eingehen, wenn innerhalb der Durchlaufzeit an mehreren Kostenstellen mit unterschiedlichen Verrechnungssätzen nicht vergleichbare Teilleistungen erstellt werden. Wenn man Zeiten wie z. B. die der Programmierung und die der Fertigung an der Maschine für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit zusammenfassen will, müßten sie in einer Weise gewichtet werden, die der Bedeutung dieser Zeiten bei der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Fertigungssysteme entspricht. Dazu könnte eine Gewichtung der Durchlaufzeiten pro Kostenstelle entsprechend der Höhe der Verrechnungssätze erfolgen. Die so definierten Leistungen von Fertigungssystemen verhalten sich umgekehrt proportional den Stückkosten. Der Wirtschaftlichkeitsvergleich ist bei den gemachten (realistischen) Vereinfachungen ein Kostenvergleich für die Fertigung eines Stückes. Allgemeingültige Aussagen können jedoch nur gemacht werden, wenn von einigen wenigen Fertigungsbeispielen auf die Gesamtheit der zu fertigenden Stücke geschlossen wird.

Während ein Wirtschaftlichkeitsvergleich also nur angibt, wie sich die Kosten für ein bestimmtes Teilespektrum bei alternativer Fertigung verhalten, gehen die Verfahren der Investitionsrechnung meist von den Investitionsausgaben aus. Als wirtschaftliches Bewertungsmaß von Fertigungssystemen können dann die Auswirkungen der Investitionsausgaben auf den Betriebserfolg dienen.

2.3 Bewertungsmöglichkeiten von Fertigungssystemen durch Verfahren der Investitionsrechnung

Die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen der verschiedenen Automatisierungsstufen soll zur Prognose der Verbreitung von Werkzeugmaschinen dieser Stufen verwandt werden. Es ist daher notwendig, daß das wirtschaftliche Bewertungsmaß im wesentlichen die Kriterien berücksichtigt, die auch in den Betrieben zur Investitionsentscheidung führen. In der Regel werden Investitionsentscheidungen nicht gefällt, bevor ihre „Wirtschaftlichkeit“ durch eine Investitionsrechnung geprüft wurde. Die wichtigsten Rechenverfahren sollen deshalb unter folgenden Gesichtspunkten diskutiert werden:

1. Wie weit berücksichtigen sie die Besonderheiten der Entwicklung fortschreitender Automatisierung der Fertigungssysteme?
2. Können aus dem uns zugänglichen Zahlenmaterial mit diesen Rechenverfahren überhaupt wirtschaftliche Erfolgsmeßzahlen für die Automatisierungsstufen ermittelt werden?

Es kann von einer Voruntersuchung ausgegangen werden, in der verschiedene Investitionsrechnungen für ihre Eignung bei der Auswahl von Produktionsmitteln zur Einzel- und Kleinserienfertigung geprüft wurden (vgl. [3], Beitrag 5).

Seit der Verwendung von Verfahren der Optimierungsrechnung zur Lösung betriebswirtschaftlicher Probleme hat man versucht, die Investitionsentscheidung mit Hilfe von Modellvorstellungen zu lösen. In einer Gesamtbetrachtung sollen dabei alle wesentlichen das Betriebsergebnis beeinflussenden Faktoren, wie Absatz-, Investitions- und Finanzplanung, gleichzeitig berücksichtigt werden.

Bei der Bewertung von Investitionsalternativen wird ermittelt, welchen Nutzen sie im Rahmen der bestehenden und der zukünftigen Fertigungsstrukturen erbringen [6]. Gegenüber der isolierten Bewertung einer Investition ist die Berücksichtigung dieser sogenannten Interdependenzen gerade für den Einsatz neuartiger Fertigungsmittel wie z. B. NC-Maschinen von Bedeutung, denn es sollten die zu erwartenden Veränderungen in der Organisation oder der Maschinenbelegung mit erfaßt werden. Beim heutigen Stand des betrieblichen Informationswesens sind

Investitionsentscheidungen über einzelne Maschinen unter Berücksichtigung aller Abhängigkeiten noch nicht möglich. Die Verfahren der Optimierungsrechnung werden aber für globale Planungen bereits verwandt. Die isolierte Prüfung des möglichen Einsatzes einer NC-Maschine mit Hilfe der heute allgemein angewandten statischen und dynamischen Investitionsrechnungen kann leicht zu negativen Ergebnissen führen, die sachlich nicht gerechtfertigt sind.

Im Rahmen der vorliegenden Studie sollen aber die Fertigungssysteme verschiedener Automatisierungsstufen unabhängig von ihrem Einsatz in bestimmten Betrieben bewertet werden. Die Interdependenz als ein wesentliches Kriterium der Investitionsentscheidung kann daher bei der Bewertung der Automatisierungsstufen nicht berücksichtigt werden.

Die dynamischen Investitionsrechenverfahren gehen davon aus, daß jede Investition durch kontinuierliche Einnahmen- und Ausgabenströme gekennzeichnet ist, deren unterschiedliche Größe, Dauer und zeitlicher Anfall als Entscheidungskriterien für die Vorteilhaftigkeit von Investitionen gelten. Diese finanzwirtschaftlichen Investitionsrechnungen berücksichtigen also in besonderem Maße den unterschiedlichen Anfall von Ausgaben und Einnahmen, die mit einem Investitionsobjekt anfallen [7]. Auf diese Weise wird eine enge Verbindung der Investitions- zur Finanzplanung des Unternehmens hergestellt. Es ist zwar möglich, die Ausgaben, die während der Einsatzzeit mit einem Investitionsobjekt verbunden sind, einigermaßen genau anzugeben; es ist aber nur selten — im Fall von einzelnen Maschinen kaum — möglich, aus den bereits unsicheren zukünftigen Umsatzeinnahmen einzelner Fertigungsprodukte den Anteil, der auf bestimmte Maschinen entfällt, abzuschätzen.

Die statischen Investitionsrechenverfahren, wie die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung und die Rentabilitätsrechnung, betrachten im Gegensatz zu den Optimierungsrechnungen der linearen Programmierung die zu vergleichenden Investitionsobjekte isoliert von den übrigen Produktionsmitteln und können auch nicht, wie die dynamischen Methoden, die Auswirkungen von Kostenschwankungen bzw. von unterschiedlich hohen Rückflüssen in den einzelnen Jahren der Einsatzzeit berücksichtigen. *Blohm/Lüder* [83] haben für die einzelnen Verfahren der statischen Investitionsrechnung, die Voraussetzungen zusammengestellt, von denen diese Verfahren ausgehen. Wenn diese Voraussetzungen berücksichtigt werden, so führen bei einfach gelegenen Investitionsalternativen die statischen Investitionsrechnungen meist zur gleichen Entscheidung wie die anderen Verfahren. Bei der Entscheidung über den Einsatz höher automatisierter Fertigungsmittel jedoch sind die

speziellen Eigenarten der verschiedenen Automatisierungsstufen und ihre Auswirkungen auf das Betriebsergebnis nur durch zusätzliche Annahmen einigermaßen zu berücksichtigen. In der Literatur über die Wirtschaftlichkeit von NC-Maschinen wird dies durch die Unterscheidung von quantifizierbaren und nicht quantifizierbaren Bewertungsfaktoren sichtbar. Wenn aber die zu erhaltenden Daten doch nicht ausreichen, um die Vorteile einer verbesserten Rechenmethode wirksam werden zu lassen, so haben diese gegenüber einer einfacheren Methode keine Vorteile mehr. Daher beruht das zu entwickelnde Investitionsrechenverfahren für den Einsatz von NC-Maschinen auf einem Kostenvergleich gegenüber der Fertigung mit konventionellen Werkzeugmaschinen.

2.4. Lösungsmöglichkeiten des Wirtschaftlichkeitsproblems im Rahmen der systemtheoretischen Strukturbilder

Die Bestimmung der Veränderung der Wirtschaftlichkeit beim Übergang von einer Automatisierungsstufe zur anderen unterscheidet sich von einem im Betrieb vorgenommenen Investitionsvergleich dadurch, daß im Betrieb

1. konkrete Fertigungsaufgaben als Vergleichsmaßstab vorliegen;
2. Werkzeugmaschinen gleicher Gattung verglichen werden;
3. aufgrund von Versuchen, Messungen der spezifischen Kostenstruktur im Betrieb und Angaben der Maschinenhersteller quantitative Vergleiche durchgeführt werden.

Es stellte sich für uns die Aufgabe, von bestimmten, in den einzelnen Betrieben so unterschiedlichen Gegebenheiten wie Werkstückspektrum, Fertigungsorganisation zu abstrahieren und losgelöst von den einzelnen Maschinengattungen für die einzelnen Automatisierungsstufen Wirtschaftlichkeitsmeßzahlen zu bestimmen.

2.4.1 Darstellung der Kostenstrukturen durch Verrechnungssätze

Um zu quantitativen Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der Automatisierungsstufen zu kommen, wurden die wirtschaftlichen Randbedingungen der einzelnen Automatisierungsstufen durch Verrechnungssätze dargestellt [3].

Ausgehend von der technischen Darstellungsweise der Automatisierungsstufen wurden dazu die einzelnen Bearbeitungsabschnitte (Information- und Materialbearbeitung), die ein Werkstattauftrag beim Durchlauf durch das System passiert, als Kostenstellen aufgefaßt und durch Verrechnungssätze bewertet. Die Verrechnungssätze geben die Kosten an, die bei Inanspruchnahme der Kostenstelle pro Stunde anfallen. Die

Leistung kann dann durch die Zeit gemessen werden, die die einzelnen Kostenstellen zur Bearbeitung eines Werkstattauftrages benötigen. Die Stückkosten ergeben sich aus diesen Angaben durch die Summe

$$k_{St} = \sum_{i=1}^9 t_i \cdot c_i \quad (2.4)$$

wobei für

$t_1 \dots t_i \dots t_9$ (Durchlaufzeiten)

$c_1 \dots c_i \dots c_9$ (Verrechnungssätze)

die Meßwerte eingesetzt werden müssen.

Die in der Systemtheorie gewählte Darstellungsweise der Kostenstrukturen ist gut geeignet, die wirtschaftlichen Randbedingungen des Maschineneinsatzes zu kennzeichnen. Allerdings müssen für die Bewertung eines bestimmten Systems die Verrechnungssätze der einzelnen Bearbeitungsabschnitte ermittelt werden, denn die Höhe der Verrechnungssätze hängt nicht nur von der Automatisierungsstufe ab. So ist z. B. der Maschinenstundensatz eines numerisch gesteuerten Bohrwerkes sehr viel höher als der einer Drehmaschine gleicher Stufe. Auch die Kostenstrukturen in der äußeren Datenverarbeitung können nicht einheitlich für bestimmte Stufen angenommen werden, sondern sind wesentlich von der jeweiligen Organisationsform der Arbeitsvorbereitung abhängig. Es wurde daher in den bisherigen Veröffentlichungen für die Kostenstrukturen pro Automatisierungsstufe der Maschinenstundensatz einer in dieser Stufe häufig vorkommenden Maschine angegeben und die Kostenstruktur der äußeren Datenverarbeitung stellten den allgemeinen Fall für die Arbeitsvorbereitung dieser Maschine dar [3].

In der äußeren Datenverarbeitung vollzieht sich gegenwärtig eine Wandlung zur verstärkten Automatisierung der Datenträgererstellung. Die kostengünstigste Erstellung des Datenträgers hängt weitgehend von der Vielgestaltigkeit des Werkstückes ab. Je mehr Programmierschritte zur Beschreibung des Werkstückes nötig sind und je mehr Berechnungen der Programmierer durchführen muß, desto wirtschaftlicher wird die Programmierung mit Hilfe von Rechenanlagen. Die optimalen Organisationsformen und damit auch die Kostenstrukturen der äußeren Datenverarbeitung hängen also nicht nur von den vorhandenen Werkzeugmaschinen ab, sondern werden wesentlich durch die Art des Werkstückspektrums der einzelnen Betriebe, also durch betriebsindividuelle Daten, bestimmt.

2.4.2 Einfluß betriebsindividueller Daten auf allgemeingültige Aussagen über die Wirtschaftlichkeit von Fertigungssystemen

Die wesentlichen Kosteneinsparungen bei NC-Maschinen werden durch die Verkürzung der Fertigungszeit erzielt. Durch die Automatisierung der Schalt- und Weginformationsverarbeitung ist

dies bisher aber nur bei den Nebenzeiten möglich gewesen; wesentliche Hauptzeitverkürzungen sind erst durch die Verwendung von adaptiven Regelungen zu erwarten. Je größer also der Anteil der erforderlichen Nebenzeiten bei einem Werkstück ist, desto höher kann im allgemeinen auch die Zeitverkürzung sein. Besonders hohe Nebenzeiteinsparungen sind daher bei Bearbeitungszentren für vielgestaltige Werkstücke durch den automatischen Werkzeugwechsel und/oder die Fertigung in einer Aufspannung möglich.

Es können also keine Angaben über die Wirtschaftlichkeit bestimmter Automatisierungsmittel gemacht werden, wenn nicht eine Beziehung zum zu fertigenden Werkstückspektrum hergestellt werden kann. Aber auch wenn die möglichen Zeiteinsparungen bei bestimmten Werkstücken bekannt sind, so ist immer noch keine endgültige Aussage über die wirtschaftlichste Fertigung möglich, denn die Höhe der Stückkosten hängt außerdem stark von der Anzahl der insgesamt zu fertigenden Stücke und von der Losgröße ab.

Es ist offensichtlich, daß sich Kosten der Programmierung in der Regel nur rentieren, wenn ein Werkstück mehrmals hergestellt wird. Die Anfertigung von starren Speichern ist meist erst bei noch größeren Stückzahlen gerechtfertigt. Auf die optimale Losgröße haben dagegen die Rüstkosten einen entscheidenden Einfluß. Besonders das oft langwierige Umrüsten bei Maschinen der Stufe 1 und 2 erlaubt meist erst bei größeren Losen eine wirtschaftliche Fertigung. Auch wenn die Losgröße durch die Lagerhaltung in Grenzen den kostenoptimalen Bedingungen der vorhandenen Maschinen angepaßt werden kann, so ist sie wie auch die gesamte voraussichtliche Stückzahl im wesentlichen jedoch eine marktabhängige Größe.

Sowohl das Teilespektrum als auch die Stückzahlen und Losgrößen sind also betriebsindividuelle Daten. Daher kann aufgrund einzelner Wirtschaftlichkeitsvergleiche in Betrieben nicht generell die Wirtschaftlichkeit bestimmter Maschinentypen nachgewiesen werden. Es können aus Einzelvergleichen nur tendenzielle Angaben über die Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Automatisierungsstufen gemacht werden.

2.4.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse durch Kostenvergleiche auf der Grundlage einer Verrechnungssatzrechnung

Nachdem sich herausgestellt hatte, daß allein aus theoretischen Untersuchungen heraus keine wirtschaftlichen Bewertungsgrößen für die einzelnen Automatisierungsstufen zu erhalten waren, wurden zunächst die verfügbaren Wirtschaftlichkeitsvergleiche von numerisch gesteuerten und konventionellen Werkzeugmaschinen aus Zeitschriften und Betriebsbesuchen gesammelt und auf ihre Brauchbarkeit geprüft.

Es war zwar zu erwarten, daß keine einheitlichen Berechnungsverfahren angewandt wurden; es zeigte sich jedoch, daß die Untersuchungen von sehr unterschiedlicher Qualität waren und in den meisten Fällen nicht für allgemeine Aussagen geeignet waren. Um aber die diesen Untersuchungen zugrunde liegenden Meßwerte unter einheitlichen Gesichtspunkten verwerten zu können, wurde ein Kostenvergleichsschema erstellt, das den systemtheoretischen Strukturbildern entspricht.

Wirtschaftlichkeitsanalysen zum Zwecke der Maschinenbelegung oder der Investitionsentscheidung werden fast immer auf der Grundlage von Kostenvergleichen bei der Fertigung auf alternativen Anlagen getroffen. Kosten können aber nur dann zum Vergleich von Anlagen herangezogen werden, wenn die Erstellung einer gleichen Anzahl gleicher Produkte zugrunde gelegt wird. Die Kostenvergleichsrechnung geht daher fast immer von der Fertigung einzelner Werkstücke aus. Es brauchen dabei nur die Kostenarten berücksichtigt zu werden, die durch die Maschinenwahl beeinflussbar sind. Da in den Restfertigungsgemeinkosten Kosten zusammengefaßt werden, die in ihrer Zusammensetzung bei NC-Maschinen völlig anders sind als bei konventioneller Fertigung, können sie nicht als prozentualer Zuschlag auf der Basis Maschinenkosten oder gar Fertigungslohn berücksichtigt werden, sondern müssen einzeln erfaßt werden. Der Kostenvergleich soll daher auf der Grundlage einer Verrechnungssatzrechnung aufgebaut werden. Die maschinenabhängigen Kosten werden dabei durch den jeweiligen Maschinenstundensatz berücksichtigt, wie er in der VDI-Richtlinie 3258 [9] vorgeschlagen wird.

Zur Berechnung der Stückkosten werden die anfallenden Kostenarten in drei Gruppen gegliedert:

- Einmalige Vorbereitungskosten K_{V_0} , die — wie z. B. die Kosten der Programmierung — auf die voraussichtliche Gesamtstückzahl umzulegen sind. Die Gesamtstückzahl berechnet sich aus dem geschätzten Jahresbedarf (J) und der voraussichtlichen „Lebensdauer“ des Werkstückes (l).
- Auftragswiederholkosten K_{AW} , die — wie z. B. die Rüstkosten — pro Betriebsauftrag anfallen und auf die Anzahl der pro Los (L) gefertigten Werkstücke verteilt werden.
- Einzelkosten K_E , deren Summe proportional der Stückzahl ist und die dem Werkstück unmittelbar zugerechnet werden können.

Die Stückkosten sind demnach:

$$K_{St} = \frac{K_{V_0}}{Jl} + \frac{K_{AW}}{L} + K_E \quad (2.5)$$

Auf eine Zusammenstellung der einzelnen Kostenarten pro Kostengruppe sei hier verzichtet; sie ist an anderer Stelle ([3] Beitrag 5) veröffentlicht worden.

Aus einem Kostenvergleich bei bestimmten Werkstücken einen Wirtschaftlichkeitsvergleich für alternative Maschinen zu entwickeln, ist für Mehrzweckmaschinen, also Maschinen, auf denen eine Vielzahl verschiedener Werkstücke hergestellt werden sollen, schwieriger durchzuführen als bei Einzweckmaschinen. Man muß sich damit begnügen, die Entscheidung am Beispiel einiger weniger Werkstücke zu fällen. Die Vorteilhaftigkeit einer NC-Maschine ist aber nicht schon gegeben, wenn einige Teile billiger gefertigt werden können als bisher, sondern erst, wenn genügend Teile kostengünstiger als bisher erstellt werden können, damit die Kosteneinsparungen über die geplante Laufzeit den Einsatz zusätzlicher Mittel für die numerischen Steuerungen, automatischen Werkzeugwechsel etc. rechtfertigen. Wenn man sich bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse nur auf die Untersuchung der Kostenstruktur weniger Werkstücke beschränkt, so hängt die Richtigkeit des Ergebnisses davon ab, ob diese Werkstücke repräsentativ für das für die Maschine geplante Gesamtteilespektrum sind.

2.4.4 Bewertung der Übergänge zu höheren Automatisierungsstufen durch die Veränderung der Rentabilität

Um eine Investition zu beurteilen, wird allgemein die Rentabilität

$$R = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Investitionsausgaben}} \quad (2.6)$$

bestimmt.

Im Falle von Einzelinvestitionen in Betrieben ist es im allgemeinen nicht möglich, auf diese Weise eine Rentabilität zu berechnen, weil eine Zuordnung vom Betriebsgewinn auf den anteiligen Gewinn, der auf die Einzelinvestition entfällt, praktisch nicht möglich ist. Es kann aber meist die Veränderung der Rentabilität, die sog. relative Rentabilität, ermittelt werden:

$$\text{relative Rentabilität} = \frac{\text{zusätzlicher Gewinn}}{\text{zusätzl. Investitionsausg.}} \quad (2.7)$$

Während die zusätzlichen Investitionsausgaben als die Differenz der Geldausgaben bei alternativen Investitionsvorhaben leicht zu erhalten sind, muß der zu erzielende zusätzliche Gewinn aus den durch die Investition entstehenden Einsparungen ermittelt werden. Wenn man dazu die Einsparungen für die Fertigung der gleichen Anzahl gleicher Werkstücke auf den alternativen Anlagen berechnet — wenn man also von einer gleichen mengenmäßigen Fertigung ausgeht —,

erübrigt sich eine Bewertung dieser Fertigung, denn der zusätzliche Gewinn ist gleich den Kosteneinsparungen. Da die Kostenvergleiche auf der Basis der Verrechnungssatzrechnung durchgeführt werden sollen, also die Kosten jeweils durch die Multiplikation des Stundensatzes mit der Durchlaufzeit pro Einheit ermittelt werden sollen, sind unterschiedliche Mengenleistungen von Maschinen zwar bei der Kosteneinsparung pro Stück berücksichtigt; die Schwierigkeit besteht aber darin, daß für eine Renditenberechnung die Einsparungen für eine durchschnittliche Jahresproduktion bekannt sein müssen. Es muß also von den Einsparungen pro Stück bei bestimmten Werkstücken auf die Einsparungen pro Jahr geschlossen werden.

Gerade beim Vergleich unterschiedlicher Automatisierungsstufen weichen aber die Mengenleistungen pro Jahr oft stark voneinander ab. Man darf nun nicht die Einsparungen auf die Jahresproduktion der Maschine mit den längeren Fertigungszeiten beziehen, denn dann würde man in den Wirtschaftlichkeitsvergleich, den Teil des Ausstoßes, den die Anlage mit den kürzeren Fertigungszeiten über den Ausstoß der alternativen Anlage hinaus zu fertigen in der Lage ist, nicht berücksichtigen. Realistischer ist es jedoch anzunehmen, daß für diesen Teil der Fertigung bei der Anlage mit der größeren Mengenleistung ähnliche Fertigungskostenunterschiede gegenüber Anlagen mit der geringeren Mengenleistung bestehen, wie sie bei den repräsentativen Werkstücken ermittelt worden sind. Bei der Hochrechnung ist daher von den Kostenunterschieden bei den untersuchten Werkstücken auf eine Jahresproduktion in Höhe der leistungsfähigeren Anlage zu schließen.

Neben der Möglichkeit, die zur Errechnung notwendigen Ausgangsdaten wenigstens teilweise zu bekommen, wurde die relative Rentabilität zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Automatisierungsstufen gewählt, weil sie die wirtschaftlichen Konsequenzen beim Übergang von einer zur nächsten Automatisierungsstufe aufzeigt. Gerade in diesen Fällen wird sich die Investitionsentscheidung an den zu erwartenden zusätzlichen Gewinnen und den bei höher automatisierten Anlagen meist zusätzlichen Investitionsausgaben orientieren. Die relative Rentabilität ist damit als wirtschaftliche Erfolgsmeßzahl für die Prognose der Einführung von Maschinen höherer Automatisierungsstufen besonders geeignet.

Man kann aber im Rahmen der diesen Untersuchungen zugrunde liegenden Systemtheorie der industriellen Produktion, die nicht auf einzelne Maschinengattungen, sondern auf Automatisierungsstufen aufbaut, nur dann eine einheitliche relative Rentabilität von einer Stufe zur anderen errechnen, wenn

1. die zusätzlichen Investitionsausgaben für einen bestimmten Automatisierungsschritt bei Maschinen verschiedener Gattung etwa gleich groß sind,
2. die Gewinnänderung, die dieser Kapitaleinsatz zur Folge hat, unabhängig von der Maschinengattung in erster Linie vom Automatisierungsgrad abhängt.

Der Versuch, die Wirtschaftlichkeit der Automatisierung von Werkzeugmaschinen durch numerische Steuerung unabhängig von einzelnen Maschinengattungen zu behandeln, mag zunächst befremden. Dahinter steht die Annahme, daß die Preise für die einzelnen Automatisierungsstufen definierenden Automatisierungsmittel unabhängig von der Maschinengattung sind und auch der Einfluß unterschiedlicher Anpassungskosten nicht zu groß ist. Ungewisser und auch schwieriger zu ermitteln ist die Voraussetzung, daß die mit gleichen Automatisierungsmitteln erzielbaren Rationalisierungseffekte bei den verschiedenen Maschinengattungen ungefähr gleich sind. In den folgenden Abschnitten sollen die Daten zur Errechnung der relativen Rentabilität beim Übergang zu höher automatisierten Fertigungssystemen ermittelt werden. Es sind dies gleichzeitig die Daten, die der Prognose in Abschnitt 5 zugrunde liegen.

2.5 Investitionsausgaben für höher automatisierte Werkzeugmaschinen

Bei der Ermittlung von zusätzlichen Investitionsausgaben beim Übergang zu höher automatisierten Maschinen sind grundsätzlich zwei Wege möglich: Einmal über die Ermittlung der Preisdifferenzen von Maschinen, die sich durch den Automatisierungsgrad unterscheiden; zum anderen über die Preise der Automatisierungsmittel selbst. Im folgenden werden beide Wege gegangen. Ein Vergleich der Ergebnisse gibt Hinweise, wieweit die Preisunterschiede tatsächlich von der Automatisierung abhängen.

Wenn man sich bei den Preisvergleichen von Maschinen nicht nur auf solche mit gleicher Grundbauart, aber unterschiedlicher Automatisierung beschränken will, so muß die Größe der Maschinen berücksichtigt werden. Es zeigte sich z. B., daß bei Drehmaschinen innerhalb der Stufen 0 bis 2 die Preissteigerungen weitgehend vom Gewicht der Maschinen abhängig waren. Diese Tendenz, die innerhalb einzelner Stufen nachgewiesen wurde, beeinflußt natürlich auch die Preisentwicklung beim Übergang zu höheren Automatisierungsstufen. Um den Einfluß des Gewichtes auf die Preise zu eliminieren, wurde eine Normierung der Preise mit dem Gewicht der Anlagen vorgenommen. Zunächst wurden Drehmaschinen und Bohrmaschinen gesondert ausgewertet. Fräs- und Bohrmaschinen wurden dabei

ab Stufe 4 zu Maschinenzentren zusammengefaßt.

Die Schwierigkeiten, die sich durch die unterschiedlichen Größen der Maschinen bei der Ermittlung der Investitionsausgabendifferenzen ergeben, entfallen weitgehend, wenn nur die Zusatzeinrichtungen, die zur Automatisierung führen, als Ausgabendifferenzen angesehen werden. Die in den Verkaufspreis eingehenden Kosten für die Umkonstruktion und Verstärkung bei Werkzeugmaschinen, die numerisch gesteuert werden sollen, können dann allerdings nicht berücksichtigt werden. Umfragen bei Herstellerfirmen haben aber ergeben, daß oft solche Veränderungen schon bald den konventionellen Maschinen zugute kommen, um durch einheitliche Grundkonstruktionen Rationalisierungseffekte zu erzielen.

Bei den Zusatzeinrichtungen ist zwischen betriebsnotwendigen und nicht unbedingt erforderlichen Zusatzeinrichtungen (Sondereinrichtungen), wie z. B. zusätzliche Anzeigeeinrichtungen, zu unterscheiden. Im folgenden sollen nur die betriebsnotwendigen Zusatzeinrichtungen behandelt werden. Sie können aufgliedert werden in:

1. Steuerungssysteme,
2. Meßsysteme,
3. Werkzeugwechseleinrichtungen,
4. Sonderausrüstungen.

Es war kaum möglich, Preisangaben für die Steuerungseinrichtungen der Stufen 1 und 2 zu ermitteln, da diese nicht als unabhängige Aggregate verkauft werden. Kopiereinrichtungen können überschlägig mit DM 10000,— bis 20000,— angenommen werden. Für die Steuerungselemente der Stufe 2 (Programmwalze, Nockenleisten mit verstellbaren Nocken, Kreuzschienenverteiler etc.) kann kein einheitlicher Richtpreis angegeben werden. Genauere Preisangaben waren aber für numerische Steuerungen zu erhalten.

Für spanende Werkzeugmaschinen werden fast ausschließlich Steuerungen für Weg- und Schaltinformationen benutzt. Die Preise für dreiaxige Streckensteuerungen schwanken zwischen DM 45000,— bis 75000,—. Bahnsteuerungen sind etwa um 50 % teurer. Die Preisspannen sind wesentlich eine Folge der unterschiedlichen manuellen Eingriffsmöglichkeiten in den Programmablauf, die dem Bediener noch gegeben sind. Mit dem Trend zu Standardsteuerungen unter Verwendung von integrierten Schaltkreisen wird die Preisdifferenz zwischen Strecken- und Bahnsteuerungen immer mehr schrumpfen. Besonders bei Drehmaschinensteuerungen ist diese Tendenz zu beobachten.

Neben den Steuerungspreisen sind die Preise der Wegmeßsysteme für die zusätzlichen Investitionsausgaben entscheidend. Die Preise hängen stark von der technischen Verwirklichung des Meßsystems — digital oder analog, absolut oder inkremental, direkt oder indirekt — ab. Neben den unterschiedlichen Preisen für die verschiedenen Arten von Meßsystemen ist der Preis für das Wegmeßsystem einer Werkzeugmaschine von der Länge der Verschiebewege abhängig. Der Preis pro Achse (K) errechnet sich aus der

$$K = c + p \times l \quad (2.8)$$

wobei c der Preis für den Meßwertaufnehmer,
p der Preis des Meßstabes pro Meter,
l der maximale Verschiebeweg ist.

Der Werkzeugwechsel wird bei der Stufe 0 und weitgehend auch bei NC-Maschinen (Stufe 3, 4, 6) manuell vorgenommen. Bei Werkzeugmaschinen der Stufe 1 (starre Informationsspeicher) und Stufe 2 (flexible, manuell einstellbare Weginformationsspeicher) erfolgt der Werkzeugwechsel teilweise selbsttätig. Umfangreiche Werkzeugwechselsysteme werden aber erst durch die Verwendung von numerischen Steuerungen möglich. Die Preise dieser Systeme hängen ab

1. von der Größe der Werkzeugmagazine (Zahl der zu speichernden Werkzeuge),
2. der Ausführungsart (Ketten-, Trommelmagazine bzw. Revolverköpfe).

Es ist deshalb offensichtlich, daß kein genereller Preis für den automatischen Werkzeugwechsel angegeben werden kann. In vielen Fällen ist der Werkzeugwechsel nicht bei Maschinen, die in ihrer Grundkonzeption schon bestanden, automatisiert worden, sondern hat zu völlig neuen Lösungen, den Bearbeitungszentren, geführt.

Unter Sonderausrüstungen sollen alle Zusatzeinrichtungen verstanden werden, die über eine gewisse Grundausstattung, die bereits die volle Funktionsfähigkeit der Maschine garantiert, hinausgehen:

1. Handeingabemöglichkeiten für Weginformationen über Dekadenschalter,
2. numerische Positionsanzeige in höheren NC-Stufen,
3. numerische Sichtanzeige für Satznummern,
4. andere Handeingabemöglichkeiten wie Kühlmittelzugabe, veränderter Vorschub u. dgl.,
5. Werkzeuglängen- bzw. Werkzeugradiuskorrekturen der programmierten Maße.

In der folgenden Preiszusammenstellung für die Zusatzeinrichtungen wurden nur solche Sonder-einrichtungen berücksichtigt, die bei einer größeren Anzahl von Herstellern in ihren Angeboten serienmäßig enthalten waren.

Tafel 2.1: Preise der Zusatzeinrichtungen beim Übergang zu höheren Automatisierungsstufen

Stufe	Achsen / Art der Steuerung	Mittelwert der Preise für Zusatzeinrichtungen [DM]	Differenz zur höheren Stufe [DM]
0			25 000,—
1		25 000,—	10 000,—
2		35 000,—	25 000,—
3	2 / Strecken	60 000,—	30 000,—
4	3 / Strecken	90 000,—	80 000,—
5	3 / Strecken	170 000,—	—60 000,—
6	2 / Bahn	110 000,—	20 000,—
7	3 / Bahn	130 000,—	120 000,—
8	5 / Bahn	250 000,—	

Als durchschnittlicher Preis für einen automatischen Werkzeugwechsel (Stufe 5 und 8) wurden für ein Magazin und eine hydraulische Werkzeugwechseleinrichtung DM 80 000,— angesetzt. Bei einem automatischen Werkzeugwechsel ohne Magazin, wie er z. B. als Revolverkopf bei Drehmaschinen üblich ist, wäre die Mehrausgabe geringer, bei größeren Wechseltmagazinen erheblich höher gewesen. Wenn die Automatisierung wie im Fall der Bearbeitungszentren oder beim Übergang von der Drehmaschine zum Mehrspindelautomaten zu neuen Fertigungslösungen geführt hat, sind, bezogen auf Automatisierungsstufen, durchschnittliche Mehrausgaben nicht sinnvoll anzugeben.

In den Fällen aber, wo sich die Maschinen in ihrer Grundkonzeption und Größe ähneln, hat die Ermittlung der Preisdifferenzen beim Übergang zu höheren Automatisierungsstufen einmal über die Preise der Endprodukte, zum anderen über die zur Automatisierung notwendigen Zusatzeinrichtungen die Vermutung bestätigt, daß die zusätzlichen Investitionsausgaben für den Kauf automatisierter Maschinen unabhängig von der Maschinengattung im wesentlichen eine Folge der Automatisierung sind.

2.6 Kosteneinsparungen bei höher automatisierten Fertigungssystemen

Zur Berechnung der relativen Rentabilität beim Übergang zu höher automatisierten Fertigungssystemen werden den zusätzlichen Investitionsausgaben die jährlichen Kosteneinsparungen gegenübergestellt.

Es war vorgesehen, von den möglichen Kosteneinsparungen bei einem fiktiven Teilespektrum auszugehen, für das die Ausgangsdaten zu Wirtschaftlichkeitsvergleichen vorlagen. Es wurden dazu eine Anzahl in der Literatur (u. a. [10] bis [18]) und bei Betriebsbesuchen gesammelte

Kostenvergleiche, die sich immer auf bestimmte Werkstücke bezogen, ausgewertet. Als Nachteil eines solchen „Teilespektrums“ muß angesehen werden, daß es wahrscheinlich aus Werkstücken besteht, die für die neueren Fertigungsverfahren gut geeignet sind, denn es werden wohl nur selten Wirtschaftlichkeitsberechnungen veröffentlicht oder bei Fallstudien dem Besucher ausgehändigt, die Fehlinvestitionen erkennen lassen.

Abweichende Ergebnisse, die auf unterschiedliche Berechnungsmethoden zurückzuführen sind, sollten vermieden werden, indem die Ausgangsdaten nach einem einheitlichen Kostenvergleichsschema (vgl. [3] Beitrag 5) aufbereitet werden sollten. Es stellte sich heraus, daß nur sehr wenige Untersuchungen für diese Vorgehensweise zu verwenden waren; teils wurden sehr spezielle Anwendungsfälle verglichen und oft fehlten wichtige Ausgangsdaten, die auch nicht zu rekonstruieren waren. Es zeigte sich jedoch, daß in sehr vielen Fällen die Zeitdifferenzen oder die prozentualen Zeitverkürzungen für das Rüsten und für die Fertigung bei alternativen Maschinen angegeben waren. Setzt man voraus, daß Maschinen verglichen wurden, deren Leistungsunterschiede hauptsächlich eine Folge der unterschiedlichen Automatisierung sind, daß die Fertigungsplanung und das Rüsten jeweils optimal erfolgt ist, und daß die Vergleichswerkstücke repräsentativ sind, dann können die in Tafel 2.2. zusammengestellten Zeiteinsparungen die wesentliche Ursache der möglichen Einsparungen an Auftragswiederholkosten und an Ausführungskosten erkennen lassen.

Die Wirtschaftlichkeit höher automatisierter Fertigungssysteme hängt aber nicht nur von den Einsparungen an der Maschine ab; es sind außerdem die Vorbereitungskosten zu berücksichtigen. Ihre Bedeutung wird um so größer, je kleiner die vorgesehenen Stückzahlen sind. Besonders für Bohr- und Fräsarbeiten sind neben den Kosten für die Programmträgererstellung die Kosten für Vorrichtungen ausschlaggebend. Die Herstellkosten für eine größere Anzahl von Werkstücken bei Bohrarbeiten hat *Stehle* [19] untersucht. Dabei wurde die NC-Fertigung und die konventionelle Fertigung mit und ohne Bohrvorrichtungen verglichen. Nennenswerte Zeiteinsparungen bei der Fertigung gab es durch NC-Maschinen nur im Vergleich zur Fertigung ohne Bohrvorrichtungen. Bei der Verwendung von Bohrvorrichtungen war aber zu berücksichtigen, daß eine solche Vorrichtung im Durchschnitt 1050,— DM kostete, gegenüber von durchschnittlich 200,— DM pro Spannvorrichtung und 250,— DM pro Programmträger bei NC-Maschinen.

Im Gegensatz zu Bohr- und Fräsarbeiten spielen unterschiedliche Werkzeug- und Vorrichtungskosten bei Dreharbeiten kaum eine Rolle. Dort

Tafel 2.2:
Rüst- und Fertigungszeitveränderungen ([10] bis [18])
(+ Zunahme, — Abnahme der Rüst- und Fertigungszeiten)

Bearbeitung	Stufen	Rüstzeit (%)	Fertigungszeit (%)
Drehen	0/1	+ 95	— 45
	0/1	+ 125	— 50
	0/2	+ 375	— 47
	0/2		— 67
	1/4		— 58
Bohren	0/4	— 80	— 77
	0/4	— 23	— 20
	0/4		— 30
	0/4		— 75
	0/4		— 62
	0/4		— 36
	0/4		— 49
Fräsen	0/4		— 65
Bohren/Fräsen	0/4		— 50
	0/4		— 58
	0/5		— 62
	0/5	— 70	— 53
	0/5	— 73	— 50
Drehen	0/5	— 68	— 62
	0/5	— 61	— 62
	0/5		— 79
	0/5		— 77
	0/7		— 48
Mittelwert aus den in [10] angegebenen Streubereichen bei 18 NC-Maschinen und 75 Werkstücken			
Drehen	—	— 60	— 65
Bohren/Fräsen	—	— 35	— 35
Fräsen	—	— 80	— 60
Stanzen	—	— 40	— 30
Bearbeitungs- zentren (12 Werkstücke)	0/5		— 50

sind die Vorbereitungskosten im allgemeinen viel geringer. Im wesentlichen sind dann die Kosten der Programmträgererstellung nur mit der Arbeitsplanerstellung bei konventionellen Maschinen zu vergleichen [10]. Gerade auf dem Gebiet der Programmträgererstellung wird es durch Verwendung von Kleinrechnern und Programmiersprachen für elektronische Datenverarbeitungsanlagen zu weiteren Kostensenkungen kommen, überschlägig wird heute angenommen, daß nur bis 50 Lochstreifensätze die manuelle Programmierung billiger ist als die maschinelle.

Eine systematische Analyse der verschiedenen Programmierverfahren konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt werden. Sie ist aber nicht nur als Teil der Wirtschaftlichkeitsanalyse von höher automatisierten Fertigungssystemen erforderlich, sondern gibt auch wichtige Hinweise für die Anforderungen, die an die Teileprogrammierer gestellt werden müssen (vgl. Abschnitt 6).

3. Analyse der Investitionsprogramme bei veränderlicher Fertigungsstruktur

Im vorigen Abschnitt wurden Methoden untersucht, die zum Zwecke der Investitionsentscheidung einen Vergleich von Fertigungssystemen unterschiedlichen Automatisierungsgrades ermöglichen. Die hierzu vorgeschlagene Ermittlung der relativen Rentabilität ist geeignet, für bestimmte Fertigungsaufgaben aus mehreren Alternativen diejenige zu bestimmen, die für eine bestimmte vorgegebene Aufgabe die günstigste im Sinne einer maximalen Rendite auf das eingesetzte Kapital ist. Auf diese Weise kann mit Hilfe der relativen Rentabilität zwar festgestellt werden, wie sich die zusätzlichen Mittel für höher automatisierte Anlagen verzinsen; es ist aber nicht möglich, daraus zu schließen, ob und wann eine ermittelte relative Rentabilität ausreicht, um zu einer Investition zu führen. Eine endgültige Entscheidung über ein Investitionsprojekt kann immer erst im Rahmen der Aufstellung des Investitionsprogramms erfolgen, in dem die Höhe der für Investitionen vorgesehenen Mittel festgelegt wird und die Verteilung der Mittel erfolgt. Es soll zunächst beschrieben werden, wie ein Betrieb sein optimales Investitionsprogramm ermitteln kann; anschließend werden die Investitionsprogramme mehrerer Betriebe im Hinblick auf die Automatisierungsstufen untersucht.

3.1 Optimale Investitionsprogramme bei technischem Wandel

Für die Aufstellung des Investitionsprogrammes eines Jahres ist nicht mehr nur die vorteilhaftere Investition aus sich gegenseitig ausschließenden Alternativen zu ermitteln, sondern es sind aus den von verschiedenen Bereichen des Betriebes gewünschten Investitionen diejenigen auszuwählen, die zusammen ein optimales Investitionsprogramm ergeben, d. h. bei begrenzten Investitionsmitteln den insgesamt höchsten Gewinnzuwachs ermöglichen. Es ist dazu den Investitionen der Vorrang zu geben, die bezogen auf die notwendigen Mittel den Gewinn des Unternehmens am meisten steigern, die also die höchste Rendite erzielen.

Um die Auswirkung des Auftretens von technischen Neuerungen bei Fertigungsmitteln erkennen zu können, ist es vorteilhaft, zu unterscheiden zwischen

1. Rationalisierungsinvestitionen und Erweiterungsinvestitionen,
2. Investitionen, die sich gegenseitig als Alternativen ausschließen und solchen, die nicht konkurrieren.

Als Beurteilungskriterium für alternative Investitionen wurde in Abschnitt 2.4.4 die relative Rentabilität entwickelt. Sie ist aber nur im Falle von Rationalisierungsinvestitionen geeignet, die Investition im Rahmen des Gesamtbudgets zu

beurteilen, weil in diesem Falle die relative Rentabilität gleich der Rendite des Teils des Gesamtinvestitionsbetrages ist, der für die Rationalisierungsinvestition notwendig ist. Bei Erweiterungsinvestitionen dagegen können mit Hilfe der relativen Rentabilität nur die in Frage kommenden Anlagen verglichen werden, es kann aber nicht daraus geschlossen werden, ob die Erweiterungsinvestition an sich überhaupt sinnvoll ist. Dies kann nach Ermittlung der absoluten Rendite der Erweiterungsinvestition beurteilt werden.

Für die Einführung höher automatisierter Fertigungsverfahren können folgende Überlegungen angestellt werden.

1. Wenn durch technische Verbesserungen Rationalisierungserfolge zu erzielen sind, so werden die für die Innovationen notwendigen Mittel solange zu Lasten geplanter Erweiterungsinvestitionen gehen, wie die relative Rentabilität der Rationalisierungsinvestitionen größer als die Rendite von Erweiterungsinvestitionen ist.
2. Eine höhere Wirtschaftlichkeit der neuen Verfahren wird die Rendite und damit die Ausführung solcher Erweiterungsinvestitionen erhöhen, die mit Hilfe dieser Verfahren realisiert werden können.
3. Bei begrenzter Investitionssumme wird sich also der Anteil der Investitionsausgaben für Innovationen erhöhen. Die Grenzrendite wird ansteigen.
4. Wird die Höhe des Investitionsbudgets durch eine bestimmte Grenzrendite festgelegt, so führen die durch die Innovationen zu erzielenden höheren Renditen zu einem Anstieg der Investitionssumme.

Wahrscheinlich wird ein Betrieb bei günstigen Investitionsmöglichkeiten zwar seine Investitionen erhöhen, aber nicht in dem Maße, daß die Grenzrendite gleich bleibt.

Ein Unternehmen kann durch eine zusätzliche Investition seinen Gewinn noch steigern, solange die Rendite der Investitionen höher liegt als die jährlichen Kosten der Kapitalaufnahme. Die Grenze für das Investitionsbudget sollte aber bereits dort gezogen werden, wo die Gewinnmöglichkeiten zusätzlicher Investitionen nicht mehr die Risiken, die mit der weiteren Kapitalaufnahme verbunden sind, rechtfertigen. Diese Entscheidung hängt wesentlich von der Beurteilung der zukünftigen Geschäftslage ab. Der Betrieb hat ferner in Rechnung zu stellen, daß die durch eine innovationsfreudige Investitionspolitik entstehenden zusätzlichen Gewinne nur solange erhalten bleiben, wie nicht durch die eigene Kapazitätsvergrößerung und/oder durch entsprechendes Verhalten der Konkurrenten die Preise der Produkte fallen.

Im folgenden Abschnitt sollen die Investitionsprogramme mehrerer Betriebe des deutschen Maschinenbaus im Hinblick auf die Einführung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen analysiert werden.

3.2 Veränderungen der Investitionsprogramme der untersuchten Betriebe

Im vergangenen Jahresbericht wurde das Vordringen der NC-Werkzeugmaschinen in einigen Betrieben des deutschen Maschinenbaus dadurch sichtbar gemacht, daß für die Jahre 1958 bis 1967 der prozentuale Anteil der NC-Maschinen an deren insgesamt im Einsatz befindlichen Werkzeugmaschinen aufgezeigt wurde. Da ihr Anteil auch 1967 noch unter 2% lag, könnte aus dieser Darstellung der Schluß gezogen werden, daß die Bedeutung der NC-Maschinen nur gering geblieben sei. Wie sehr dieser Eindruck falsch sein kann, zeigt das Beispiel des Betriebes Nr. 2. Dort betrug 1969 der Anteil der NC-Maschinen zwar nur 4,56 % der produzierenden Maschinen. Es sind aber bereits 24,7 % aller lebenden Werkstücke programmiert worden [20].

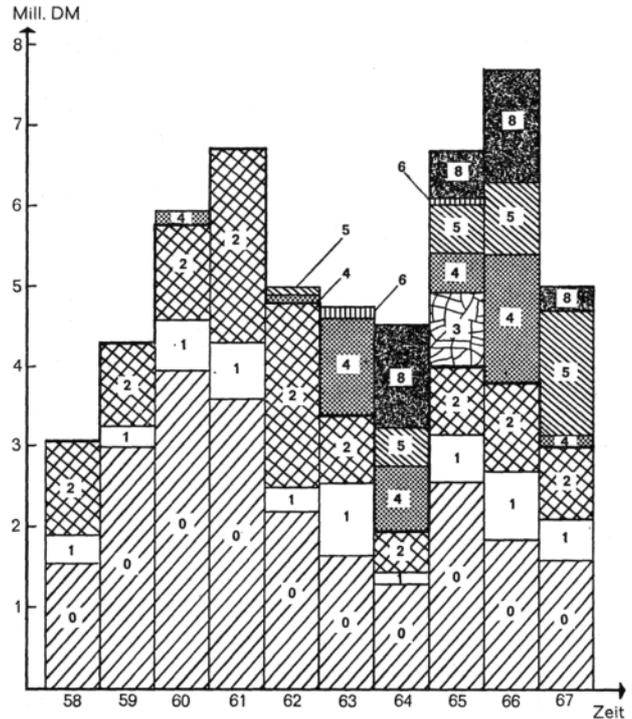
Würde man den Anteil der NC-Fertigung also nicht mit v. H. der Maschinenanzahl, sondern der Fertigungskapazität angeben, so käme ihre Bedeutung schon eher zum Ausdruck. Für die Beurteilung des zukünftigen Einsatzes dieser Maschinen ist das Gewicht, das die Betriebe den NC-Maschinen bei der Aufstellung ihrer Investitionsprogramme beimessen, ein gutes Kriterium. Aus dem bei den Fallstudien aufgenommenen Zahlenmaterial wurde deshalb versucht, die Investitionsprogramme für Werkzeugmaschinen entsprechend den Automatisierungsstufen aufzugliedern. Von den 10 untersuchten Betrieben erwiesen sich nur die Angaben von 6 Betrieben als ausreichend, um die Investitionsanalyse durchführen zu können. Es wurden für jeden der 6 Betriebe und zusammengefaßt für alle 6 Betriebe folgende Angaben ermittelt:

1. absolute und relative Verteilung der jährlich investierten Werkzeugmaschinen nach Automatisierungsstufen,
2. absolute und relative Verteilung der jährlichen Investitionsausgaben für Werkzeugmaschinen nach Automatisierungsstufen (Bild 3.1),
3. Anzahl und Aufgliederung nach Automatisierungsstufen der ausgeschiedenen Werkzeugmaschinen.

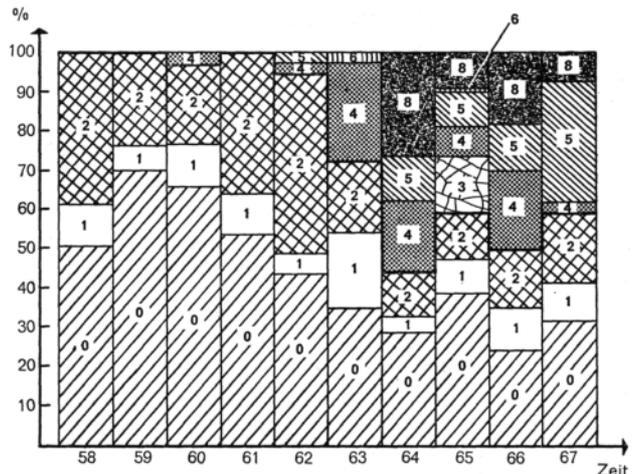
Mit der Ausnahme von einer Maschine im Jahre 1960 begann der Einsatz von NC-Maschinen erst 1962. Von 1958 bis zu diesem Zeitpunkt stiegen die Anzahl der neu eingesetzten Maschinen und die Investitionssumme etwa gleichmäßig um insgesamt etwa 100% auf über 150 Maschinen. 1962 gehen die Investitionen stark zurück. Ab 1962 werden jährlich etwa 70 Maschinen inve-

Bild 3.1 Investitionsausgaben in sechs Betrieben nach Automatisierungsstufen

a) in absoluten Werten



b) Anteile in Prozent



tiert. Während diese Zahl nur gering schwankt, stiegen die wertmäßigen Investitionen 1965 und 1966 stark an. Dies ist auf den wachsenden Anteil der teureren NC-Maschinen zurückzuführen. Ihr Anteil an den Investitionsausgaben stieg von 1962 5,2 % auf 28,2 % 1963 bis zum Höchstwert von 56,3% im Jahre 1964. Dieser hohe Ausgabenanteil für NC-Maschinen ist nicht nur eine Folge ihres zahlenmäßigen Anstiegs von 10% auf 15% aller Maschinen, sondern wird wesentlich durch die Ausgaben für den automatischen Werkzeugwechsel bei 4 Maschinen einschließlich eines großen amerikanischen Bearbeitungszentrums beeinflusst. Den höchsten zahlenmäßigen Anteil hatten die NC-Maschinen 1966 mit 21,4% erreicht. Wertmäßig betrug er dabei

etwas über 50 %. Durchschnittlich lag der Anteil der NC-Maschinen an den Investitionsausgaben ab 1963 bei 45%. Dieser hohe Anteil der Investitionsausgaben für NC-Maschinen ging hauptsächlich zu Lasten der handbedienten konventionellen Werkzeugmaschinen.

Aus der Tatsache, daß der Anteil der jährlich neu eingesetzten Maschinen der Stufe 2 erheblich über ihrem Anteil an den bereits vorhandenen Maschinen liegt, kann aber geschlossen werden, daß die manuell bedienten Werkzeugmaschinen unabhängig von den NC-Maschinen — wenn auch im geringeren Maße — auch durch die Automatisierung mit flexiblen Speichern in der inneren Datenverarbeitung aus einigen bisherigen Anwendungsbereichen verdrängt werden. Der Anteil der Ausgaben für diese Maschinen stieg bis zur Einführung der NC-Maschinen noch an, ging aber danach um etwa die Hälfte zurück. Es ist verständlich, daß mit der Einführung numerischer Steuerungen nicht nur die konventionellen Maschinen, sondern auch die Maschinen mit flexiblen Speichern in der inneren Datenverarbeitung zurückgegangen sind, denn für Betriebe der Einzel- und Kleinserienfertigung sind — besonders wenn sich die Aufträge wiederholen — die NC-Maschinen den Maschinen der Stufe 2 durch geringere Rüstzeiten meist überlegen.

Lediglich die Maschinen der Stufe 1 konnten ihren Anteil im Durchschnitt gesehen halten. Diese automatisierten Maschinen mit starren Speichern aus der äußeren Datenverarbeitung finden hauptsächlich in der Massenfertigung Anwendung. Im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung übernehmen sie meist nur die auch dort in größeren Stückzahlen anfallenden Fertigungen von häufig benötigten Werkstücken (z. B. Zahnräder), also Arbeiten, für die NC-Maschinen weniger oder nicht geeignet sind.

Nachdem bei den Betriebsbesuchen 1968 nur die Zahlen bis zum Jahre 1967 aufgenommen worden waren, wurde im Herbst 1969 eine schriftliche Befragung der besuchten Betriebe durchgeführt. Da hinsichtlich der Investitionsplanungen die Angaben teilweise in Prozent verschlüsselt angegeben wurden, mußten für die einzelnen Betriebe zunächst die Anteile der Ausgaben für NC-Maschinen ermittelt und dann daraus der Durchschnitt für alle Betriebe errechnet werden. Auf diese Weise gehen die Werte unterschiedlich großer Betriebe mit gleicher Gewichtung in das Ergebnis ein. Die Ergebnisse in Bild 3.1 sind dagegen durch Zusammenfassung der Ausgangsdaten entstanden. In 4 Betrieben wurden durchschnittlich

1968	37,0%
1969	49,7%
1970	geplant 44,5%

der Maschinenausgaben für NC-Maschinen verwendet.

Die Durchschnittswerte aus den Zahlen der Jahre 1968 bis 1970 sind ferner mit den bisherigen Ergebnissen der Jahre bis 1967 nur bedingt vergleichbar, da 2 der 6 in der bisherigen Untersuchung berücksichtigten Betriebe keine Angaben machten.

Besonders aufschlußreich war aber die Antwort eines Betriebes, der wegen fehlender Angaben bei der Auswertung der Investitionen bis 1967 nicht berücksichtigt werden konnte. Bei der Ermittlung des Mischungsverhältnisses von Maschinen unterschiedlicher Produktionen war der Anteil der NC-Maschinen im Verhältnis zu den insgesamt eingesetzten Maschinen nur sehr gering, weil wegen der Größe des Betriebes der Einsatz von 11 NC-Maschinen kaum ins Gewicht fiel.

Von 1968 bis 1970 sind jedoch mit 19 NC-Maschinen in drei Jahren fast doppelt so viele NC-Maschinen eingesetzt worden als in den fünf Jahren zuvor. Auch bei diesem Großbetrieb ist inzwischen der Anteil der Ausgaben für NC-Maschinen an den gesamten Maschinenausgaben auf durchschnittlich 45 % gestiegen. In den Jahren zuvor waren es schätzungsweise nur 15 bis 25%. Die Investitionspolitik für 1968 bis 1970 hinsichtlich NC-Maschinen scheint sich bei den übrigen Betrieben gegenüber der Zeit vor 1968 nicht mehr viel geändert zu haben. Es werden in diesem Zeitraum von drei Jahren jeweils etwa nochmal die gleiche Anzahl NC-Maschinen investiert, wie sie bereits vorhanden war. Insgesamt bleibt für alle Betriebe der durchschnittliche Investitionsausgabenanteil für NC-Maschinen mit etwa 45 % gleich dem Durchschnitt für die Jahre 1963 bis 1967.

In diesen oben genannten Zahlen sind nicht die zumeist ausgabenwirksamen hohen zusätzlichen Kosten, die durch den Einsatz von NC-Maschinen in der Arbeitsvorbereitung anfallen, enthalten. Bei deren Berücksichtigung hätte der Anteil der Ausgaben für NC-Maschinen sicher über 50% der Maschinenausgaben gelegen.

3.3 Bedeutung für prognostische Überlegungen

Es soll aus der Investitionsanalyse keine zahlenmäßige Prognose für den künftigen Einsatz von NC-Maschinen abgeleitet werden, da dies in Abschnitt 5 auf andere Weise geschieht. Die Zahl der 6 berücksichtigten Betriebe ist auch zu gering und der Zeitraum von 1963 bis 1970, in dem bisher NC-Maschinen investiert wurden, zu kurz, um allein dadurch zu einer solchen Prognose zu kommen. Diese Einschränkung trifft — wenn auch in geringerem Maße — ebenso für die folgenden Schlüsse aus der Investitionsanalyse zu.

Wenn man annimmt, daß das Investitionsprogramm in der in Abschnitt 3.1 geschilderten

Weise nach Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten erfolgt, so könnte man geneigt sein, aus dem Investitionsverhalten Schlüsse auf die Wirtschaftlichkeit der Automatisierungsstufen zu ziehen. Das ist aber nur bedingt möglich. Wenn die NC-Maschinen gegenüber konventionellen Werkzeugmaschinen tatsächlich in so vielen Fällen wirtschaftlicher sind — wie es die geschätzten Sättigungsgrenzen und die Ausführungen in Abschnitt 2 erkennen lassen —, so müßten doch gerade zu Beginn des Auftretens dieser Maschinen fast nur NC-Maschinen investiert werden. Erst wenn man sich der Sättigungsgrenze nähert hätte, würde der Anteil der konventionellen Maschinen am Investitionsprogramm wieder ansteigen, zumal dann auch die noch vorhandenen konventionellen Maschinen verstärkt ersetzt werden müßten. Gegen diese Annahme spricht die Tatsache, daß der Einsatz der NC-Maschinen in der äußeren Datenverarbeitung nicht nur zusätzliche Ausgaben verursacht, sondern die organisatorischen Umstellungen und Lernprobleme so groß sind [3, 21], daß von dieser Seite der Einführungsgeschwindigkeit Grenzen gesetzt werden. Berücksichtigt man ferner die allgemeinen psychologischen Widerstände gegen Neuerungen, so kann man nur feststellen, daß der Anteil der Ausgaben für NC-Maschinen erstaunlich schnell gestiegen ist. Dies war in den untersuchten Betrieben wesentlich auf die positive Haltung weniger Führungskräfte zurückzuführen. Es scheint auch so, daß ein Anteil von 45% der Maschinenausgaben — einschließlich Ausgaben in der äußeren Datenverarbeitung vielleicht 50 bis 60% — und 15 bis 25% der neu investierten Maschinen längerfristig eine vernünftige Grenze für den jährlichen Einsatz von NC-Maschinen bei Betrieben der Einzel- und Kleinserienfertigung ist.

Bei der Prognose der zahlenmäßigen Veränderungen der Arbeitsplätze ist von der Anzahl der investierten Maschinen auszugehen. Es sind ferner die ausgeschiedenen Maschinen zu berücksichtigen. Wahrscheinlich werden nicht alle ausgeschiedenen Maschinen in der letzten Zeit ihres Einsatzes voll ausgelastet gewesen sein, so daß nicht jeder dieser Maschinen ein voller Arbeitsplatz entspricht, wie es jedoch bei den neu eingesetzten Maschinen fast immer der Fall sein wird. Sieht man einmal von den Produktionsauslagerungen im Jahre 1966 in einem Betrieb ab, so weicht die Zahl der ausgeschiedenen Maschinen — es sind sämtlich konventionelle Maschinen — kaum von der Zahl der konventionellen Maschinen ab, die mit Beginn der Einführung von NC-Maschinen in den 6 Betrieben investiert worden sind.

Es ist zu erwarten, daß durch die größere Mengenleistung der automatisierten Maschinen in Zukunft die Zahl der Maschinenbediener nicht

entsprechend der Produktion ansteigt. Während noch 1960/61 der hohe Anstieg der Investitionsausgaben zu einem entsprechenden zahlenmäßigen Einsatz neuer Maschinen führte, traf dies bereits 1965/66 nicht mehr zu, weil die Mehrausgaben wesentlich auf die teuren NC-Maschinen entfielen. Innerhalb der NC-Maschinen verschiebt sich das Gewicht zu den teuren Maschinen mit automatischem Werkzeugwechsel. Dadurch verstärkt sich noch der Trend zur kapitalintensiveren Fertigung, dem aber bezüglich der Zahl der Arbeitsplätze auch die Entwicklung zum Mehrschichtbetrieb entsprechen könnte.

4. Allgemeine technologische Entwicklungstrends im Bereich der Fertigungstechnik

Für die Verlässlichkeit der weiter unten dargestellten Prognosen ist es unerlässlich, sich über die allgemeine technologische Entwicklung, in die die spezielle, hier bevorzugt betrachtete Entwicklung der NC-Maschinen eingebettet ist, wenigstens einen groben Überblick zu verschaffen. Insofern nämlich einzelne Trends dieser allgemeinen technologischen Entwicklung einen möglichen Einfluß auf die Verbreitung von NC-Maschinen ausüben können, sind diese bei der Prognose als Randbedingungen zu beachten.

Als derartige Randbedingungen sollen im folgenden mögliche Veränderungen auf den Gebieten der

- Werkstoffe
- Fertigungsverfahren
- NC-Fertigung

betrachtet werden. Notgedrungen handelt es sich dabei natürlich nur um heute bereits erkennbare Trends, die zu dem nur qualitativ für die weiter unten dargestellten prognostischen Betrachtungen aufbereitet werden sollen.

4.1 Veränderungen auf dem Gebiet der Werkstoffe

Einer der augenscheinlichsten Entwicklungstrends im Bereich der Fertigungstechnik ist das ständige Vordringen neuer Werkstoffe, die bei gegebenen Ansprüchen an die Festigkeitseigenschaften Vorteile bei der fertigungstechnischen Handhabung gegenüber konventionellen Werkstoffen bieten. Allen voran gehören dazu die Leichtmetalllegierungen und Kunststoffe, die zum Teil erhebliche Verbesserungen bekannter oder ganz neue Fertigungsverfahren des Urformens, Umformens und Trennens mit sich brachten. Beispiele dafür sind der Präzisionsguß, der Spritzguß für Kunststoffe und die erheblich höheren Schnittgeschwindigkeiten bei der spanenden Bearbeitung.

Belegen läßt sich diese Entwicklung unter anderem mit der Schätzung, daß die Kunststoffpro-

duktion um das Jahr 1980 volumenmäßig mit der Stahlproduktion gleichgezogen haben wird. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird der überwiegende Teil dieser Produktion im Bereich der Massenfertigung Verwendung finden. Dort sind allerdings die Chancen für die Einführung numerischer Prozeßsteuerungen vorläufig noch gering, da der dabei zu bewältigende Informationsfluß vergleichsweise zu klein ist, als daß er gegenwärtig den technischen und wirtschaftlichen Aufwand rechtfertigen könnte.

Ein geringerer Teil der genannten neuen Werkstoffe wird aber zweifellos auch Eingang in die Kleinserienfertigung finden. Die Verwendung von Leichtmetallen und Kunststoffen ermöglicht dabei ganz erheblich höhere Schnittgeschwindigkeiten, die zu Vorschüben im Bereich heutiger Eilgangsgeschwindigkeiten und darüber sowie zu Drehzahlen in der Größenordnung von 10^4 U/min führen. Ein eindrucksvolles Beispiel dazu liefert das MOLINS-System 24 [22], dessen Fertigungsstationen speziell für die Leichtmetallbearbeitung entwickelt wurden und Drehzahlen bis zu $3 \cdot 10^4$ U/min ermöglichen. Für eine sichere Beherrschung der Kinematik solcher Werkzeugmaschinen ist die Verwendung automatisch geregelter Antriebssysteme eine unabdingbare Voraussetzung. Diese stellen insofern eine Vorstufe der numerischen Steuerung von Werkzeugmaschinen dar, als sie automatisch arbeitende Meßsysteme einschließlich Vergleichen sowie die Möglichkeit der Eingabe von Positions-Sollwerten erforderlich machen, an denen einzelne Schlittenbewegungen mit der geforderten Genauigkeit abgeschaltet werden sollen. So erscheint es sicherlich sinnvoll, einen großen Teil dieser Werkzeugmaschinen weiter zu automatisieren, indem man sie mit einer vollständigen Steuerung einschließlich eines Lesers für Lochstreifen oder Magnetbänder ausrüstet, zumal die Preise für Steuerungen eher fallende Tendenz zeigen [3] und die übrigen Elemente ohnehin bereits erforderlich sind.

Damit läßt sich als Ergebnis dieser Überlegungen festhalten, daß die zunehmende Verwendung neuer Werkstoffe wie Leichtmetalllegierungen und Kunststoffe im Bereich der Kleinserienfertigung die Verbreitung von NC-Maschinen eher beschleunigen wird, als daß sie dieser Entwicklung hinderlich ist.

4.2 Veränderungen auf dem Gebiet der Fertigungsverfahren

Den Einfluß neuer Fertigungsverfahren auf die Verbreitung der NC-Maschinen abzuschätzen, erweist sich als schwierig und mit relativ hohen Unsicherheiten belastet. Zwar sind bereits eine ganze Reihe von neuen Fertigungsverfahren in letzter Zeit entwickelt worden und in den techni-

schen Einzelheiten bekannt. Beispiele dafür sind das chemische Abtragen, das Erosions-Abtragen, das Elektronenstrahl-Abtragen und -Schweißen, das Laser-Abtragen und andere mehr.

Die Schwierigkeiten, den möglichen Anwendungsbereich dieser Verfahren sowie die technisch-wirtschaftlichen Möglichkeiten, diese Prozesse numerisch zu steuern, abzuschätzen, sind im wesentlichen darin zu sehen, daß sie zum Teil bislang nur für ganz spezielle Fertigungsaufgaben und damit in einem sehr beschränkten Anwendungsbereich eingesetzt wurden oder sich gar noch mehr oder weniger im Versuchsstadium befinden. Wenn sich diese Prozesse auch im Prinzip numerisch steuern lassen und im einen oder anderen Fall eine numerische Steuerung Anwendung fand, so kann von daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt doch noch nicht auf einen allgemeinen Anwendungsfall geschlossen werden.

Eine andere Frage ist es, inwieweit sich über die heute weit verbreiteten Verfahren des Bohrens, Drehens, FräSENS und Schleifens hinaus weitere bewährte Fertigungsverfahren ebenfalls wirtschaftlich sinnvoll numerisch steuern lassen. Beispiele dafür sind das Stanzen und Hobeln, beides Anwendungsfälle für numerische Steuerungen, die auch im Laufe der Betriebsuntersuchungen im praktischen Einsatz verfolgt werden konnten. Für diese Fälle gilt aber auch, daß das damit gefertigte Teilespektrum einen nur sehr kleinen Anteil an der gesamten Fertigungskapazität in Anspruch nimmt und somit der Einfluß auf die allgemeine Verbreitung von NC-Maschinen vorläufig gering bleibt.

Ferner muß zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch offen bleiben, inwieweit in der Kleinserienfertigung spanende Fertigungsverfahren durch nicht spanende ersetzt werden können. Im allgemeinen kann erwartet werden, daß eine derartige Substitution in nur sehr geringem Maße möglich ist, da gerade die hohe Flexibilität und leichte Umrüstbarkeit als Kennzeichen spanender Werkzeugmaschinen deren bevorzugten Einsatz in der Kleinserienfertigung bestimmt. Zumal dann, wenn relativ enge Fertigungstoleranzen und hohe Oberflächengüte gefordert sind, dürften nicht spanende Fertigungsverfahren keine Alternative bieten, da deren Einsatz sich wegen der dabei benötigten sehr teuren formspeichernden Werkzeuge erst bei sehr großen Stückzahlen wirtschaftlich rechtfertigen läßt.

Damit kann für das folgende zusammenfassend festgestellt werden, daß es angesichts der zum Teil noch erheblichen Unsicherheiten sinnvoll ist, den Einfluß von Veränderungen auf dem Gebiet der Fertigungsverfahren vorläufig für die weitere Verbreitung der NC-Maschinen als indifferent anzusehen.

4.3 Veränderungen auf dem Gebiet der NC-Technik

Neben möglichen Erweiterungen des Anwendungsbereichs numerischer Steuerungen ist es aber auch von großer Bedeutung für die weitere Entwicklung zu wissen, welche Veränderungen sich wahrscheinlich in dem heute üblichen, hauptsächlichlichen Einsatzbereich ergeben werden und welchen Einfluß sie mutmaßlich auf die Verbreitung gegenwärtig einsatzfähiger NC-Maschinen ausüben. Zu diesen hauptsächlichlichen Einsatzbereichen gehören die Fertigungsverfahren des Bohrens, Drehens, FräSENS und in zunehmendem Maße auch des Schleifens, wie überhaupt im allgemeinen die diesen Verfahren zugeordneten Werkzeugmaschinenengattungen mit zusammen etwa 75 % (Schätzung aufgrund einer Analyse von 5 Betrieben) den größten Teil einer üblichen Fertigungskapazität ausmachen.

Für eine Analyse der technischen Entwicklung in diesem Bereich ebenso wie für daraus ableitbare prognostische Überlegungen hat sich die theoretische Grundlage der systemtheoretischen Strukturbilder [1, 3] als nützliches methodisches Werkzeug erwiesen. So konnte beispielsweise der technische Stand der Entwicklung 1967/68 recht genau bestimmt werden. Wie aus dem Jahresbericht 1968 hervorgeht, sind die gegenwärtig höchst automatisierten Fertigungssysteme NC-Maschinen der Stufe 8, Werkzeugmaschinen mit mehreren numerisch bahngesteuerten Achsen und automatischem Werkzeugwechsel. Vergleicht man die Struktur von innerer und äußerer Datenverarbeitung der Fertigungssysteme der Stufen 4 bis 8 untereinander — Systeme der Stufe 3 haben heute ohnehin nur noch geringe Bedeutung —, so zeigt sich deren große Ähnlichkeit. Zwar steigt der Umfang der numerisch formulierten Informationsflüsse und damit auch der Programmieraufwand mit wachsendem Automatisierungsgrad, die Struktur von äußerer und innerer Datenverarbeitung ändert sich jedoch im Vergleich zu den noch höher automatisierten Fertigungssystemen nur geringfügig. Die wohl augenscheinlichste und wichtigste Veränderung innerhalb der Stufen 4 bis 8 ist durch den zeitweisen Einsatz eines Digitalrechners in der äußeren Datenverarbeitung der höheren Automatisierungsstufen als Hilfsmittel der maschinellen Programmierung gekennzeichnet. Damit wird dem gewachsenen Programmieraufwand Rechnung getragen, der sich so wirtschaftlich bewältigen läßt. Auf dem Wege dahin sind, von der rein manuellen Programmierung ausgehend, eine Reihe von Zwischenlösungen denkbar und auch in der betrieblichen Praxis eingeführt, um häufig wiederkehrende Routineberechnungen bei der Programmierung zu erleichtern. Dazu gehören kleinere Tischrechner etwa für Umrechnungen von Polar-Koordinaten in kartesische Koordinaten oder sogenannte Programmierplätze mit ein-

gebauten Kleinrechnern und Zeichensimulatoren, mit denen sich zusätzlich etwa auch Kollisionskursberechnungen zwischen Werkstück und Werkzeug anstellen lassen, und dergleichen mehr. Auch sind Bestrebungen bekannt geworden, die verhältnismäßig große Rechner erfordernden problemorientierten Programmiersprachen so zu schrumpfen, daß sie für ein zwar eingeschränktes, aber immerhin noch umfangreiches Spektrum häufig vorkommender Teile auf wesentlich kleineren Rechnern anwendbar werden [21].

So unterschiedlich die technischen Mittel der Hard- und Software zur Erleichterung der Programmierung von NC-Maschinen auch sein mögen, für die in den folgenden Abschnitten anzustellenden prognostischen Überlegungen reicht es jedoch aus, die verschiedenen hoch automatisierten Fertigungssysteme der Stufen 4 bis 8 trotz der geringfügigen strukturellen Unterschiede zu einer Klasse zusammenzufassen. Bei den später zu ziehenden Folgerungen für die damit zusammenhängenden Arbeitsplatzstrukturen muß diese Vereinfachung natürlich berücksichtigt werden. Die Entwicklung und Existenz der hier kurz erwähnten vielfältigen Programmiererleichterungen begünstigt insgesamt die Verbreitung von NC-Maschinen erheblich, ein Umstand, der daher in dem weiter unten dargestellten Prognosemodell auch unmittelbar Berücksichtigung findet.

Aus der Beschreibung und Analyse der technischen Entwicklung im Bereich der NC-Fertigung mit Hilfe der systemtheoretischen Strukturbilder läßt sich erkennen, daß diese mit dem praktischen Einsatz von Fertigungssystemen der Stufe 8 einen ersten wesentlichen Abschnitt durchlaufen und damit eine Art Wendemarke erreicht hat. Dies zeigt sich auch daran, daß seit längerer Zeit keine — im Sinne der systemtechnischen Betrachtungsweise — wesentlichen technischen Neuerungen auf dem Sektor der NC-Fertigung aufgetreten sind, unbeschadet der Tatsache, daß selbstverständlich die bereits bestehenden Systeme ständig technisch und organisatorisch weiterentwickelt, vielgestaltiger und verbessert worden sind. Den für die weitere Entwicklung wesentlichen Schritt auf dem Gebiet der NC-Fertigung kennzeichnen aus systemtechnischer Sicht die adaptiv geregelten NC-Maschinen einerseits und mehrere direkt durch einen Digitalrechner gesteuerte und damit zu einem größeren Verband verknüpften Werkzeugmaschinen andererseits.

Vorläufer von adaptiv geregelten NC-Maschinen wurden bereits auf der Internationalen Werkzeugmaschinen-Ausstellung 1969 in Paris gezeigt, die zwar noch mit relativ einfachen Festwertreglern für konstante Antriebsleistung ausgerüstet waren, aber doch bereits die wesentli-

chen mit dieser Entwicklung verbundenen Veränderungen für die Fertigung erkennen ließen. Diese sind im wesentlichen in der veränderlichen Hauptzeit (Zeit für die spanende Bearbeitung) und in der grundsätzlich vereinfachten Programmierung zu sehen. Indem nämlich das Regelsystem unter Vorgabe gewisser Gütekriterien — gegenwärtig noch unter Vorgabe einer festen maximalen Antriebsleistung — automatisch die zu jedem Zeitpunkt günstigsten (oder maximal möglichen) Schnittwerte ermittelt, verringert sich der Programmierungsaufwand für solche Maschinen gerade um den sowohl bei manueller wie maschineller Programmierung besonders zeitraubenden Teil der Bestimmung der Schnittwerte. Diese erhebliche Vereinfachung der äußeren Datenverarbeitung dürfte mit großer Wahrscheinlichkeit auch deren Struktur dahingehend verändern, daß man dort beim Einsatz adaptiv geregelter NC-Maschinen generell mit einfachen Programmierhilfsmitteln und kleinen Rechnern oder beim Zugriff auf größere Datenverarbeitungsanlagen mit sehr viel kleineren Rechenzeiten auskommt. Zu vermuten ist, daß sich beim heutigen Stand der Technik die adaptiven Regler als auf ihre Aufgabe spezialisierte kleine Recheneinheiten sehr viel billiger verwirklichen lassen, als es der diesem Schritt entsprechende Übergang zu größeren Datenverarbeitungsanlagen in der äußeren Datenverarbeitung erfordern würde.

Damit bahnt sich möglicherweise auch in der Fertigungstechnik eine Tendenz zu hierarchisch aufgebauten Datenverarbeitungssystemen zur Steuerung von Fertigungsprozessen an, wie sie beispielsweise in der Verfahrenstechnik schon oft verwirklicht wurden. Ungeachtet dieser Aspekte zeichnet sich noch eine weitere Entwicklungstendenz ab, die sich etwa anhand der Automatisierungsstufen 10 bis 12 kennzeichnen läßt. Es handelt sich dabei um eine sehr viel engere Verknüpfung von NC-Maschinen mit Datenverarbeitungsanlagen, als das bisher etwa bei der maschinellen Programmierung der Fall war, indem über die Programmierung hinaus noch weitere Tätigkeitsbereiche der äußeren Datenverarbeitung durch den Einsatz von Datenverarbeitungsanlagen automatisiert werden. Dazu können das rechnergestützte Konstruieren, die Fertigungssteuerung, die Werkzeugverwaltung und anderes mehr gehören, gleichgültig, ob nun die Datenverarbeitungsanlagen direkt (on-line) oder unter Zwischenschaltung von Datenträgern (off-line) mit den Werkzeugmaschinen verknüpft werden. In jedem Falle sind damit erhebliche Strukturveränderungen der Fertigungssysteme verbunden. Wesentlich ist, daß dabei ganze Gruppen von Werkzeugmaschinen unter übergeordneten Optimierungsgesichtspunkten gemeinsam gesteuert werden und die äußere Datenverarbeitung weitgehend automatisiert ist.

Es erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt kaum möglich, Fertigungssysteme dieser Art in ihren technischen Einzelheiten, insbesondere die Feinstruktur des Informationsflusses, genauer zu beschreiben. Sicher ist aber, daß an vielen Stellen von Forschung und Industrie in allen Industrieländern intensiv an der Verwirklichung solcher Systeme, die man in Kurzfassung als „NC-Maschinenstraßen“ bezeichnen kann, gearbeitet wird und nach allem, was darüber bekannt wurde, werden sie in diese hier kurz skizzierte Richtung entwickelt. Einzelne Zwischenlösungen auf dem Wege dahin sind auch bereits verwirklicht worden (vgl. [22, 23]); es ist zu erwarten, daß im September 1970 in Hannover auf der Internationalen Werkzeugmaschinen-Ausstellung einige Mustersysteme vorgestellt werden. Da das hinter dieser Entwicklung stehende Konzept bezüglich der Automatisierung von Fertigungssystemen weit über die bisherige Entwicklung von NC-Maschinen hinausgeht, ist es sinnvoll, diese NC-Maschinenstraßen gesondert zu betrachten, zumal sie sich noch in keiner Weise quantitativ fassen läßt. Welche Konsequenzen sich aber heute bereits für die dadurch veränderten Arbeitsplatzstrukturen erkennen lassen, soll weiter unten erläutert werden.

5. Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen

5.1 Übersicht über die Möglichkeiten der Prognose auf der Grundlage systemtheoretischer Strukturbilder

Die bisher angestellten Untersuchungen haben eine recht deutliche Steigerung des Automatisierungsgrades von Fertigungssystemen der Einzel- und Kleinserienfertigung sichtbar werden lassen. Darüber hinaus konnte anhand der systemtheoretischen Strukturbilder die Abhängigkeit der Arbeitsplatzstrukturen vom Automatisierungsgrad der entsprechenden Fertigungssysteme — zumindest für bereits realisierte Systeme — aufgezeigt werden (vgl. [1]).

Auf dieser Grundlage erscheint es zweckmäßig, eine Prognose der mutmaßlichen zukünftigen Entwicklung in zwei Schritten vorzunehmen:

1. Qualitative wie quantitative Prognose der technischen Entwicklung von Fertigungssystemen;
2. Prognose der Arbeitsplatzstrukturveränderungen aufgrund der Zuordnung zu den Fertigungssystemen.

Versucht man, zunächst die technische Entwicklung der Automatisierung im Bereich der Kleinserienfertigung, wie sie im Maschinenbau dominierend ist, langfristig zu prognostizieren, so hat man dabei im wesentlichen zwei Teilentwicklungen zu verfolgen: Auf der einen Seite das Vordringen der heute bereits erfolgreich eingesetzten NC-Maschinen bis zur Stufe 8 und auf der

anderen Seite die Entwicklung von noch höher automatisierten Fertigungssystemen, mit deren Verwirklichung und praktischem Einsatz in naher Zukunft zu rechnen ist.

Grundsätzlich bieten sich für die Prognose beider Entwicklungen explorative und normative Methoden an (vgl. dazu [24]). Allerdings erscheinen die normativen Methoden für die hier anzustellenden Untersuchungen von nur geringem Wert. Das liegt vor allem daran, daß die dem Fertigungsprozeß zugrunde liegenden Normen und Zielsetzungen gegenwärtig viel zu allgemein und unbestimmt sind, als daß sich darauf eine fundierte und ins einzelne gehende Prognose stützen könnte. Auf eine sehr wichtige Norm jedoch, die — wie noch zu zeigen ist — die Entwicklung maßgeblich beeinflußt, die Forderung nämlich nach größtmöglicher Wirtschaftlichkeit der Fertigungssysteme, sei hier ausdrücklich hingewiesen (vgl. auch Abschnitt 2).

Demgegenüber hat sich im Laufe der Untersuchungen herausgestellt, daß eine Reihe von Methoden aus dem Bereich der explorativen Prognose-Verfahren für eine Vorausschau auf die künftige Entwicklung der NC-Maschine und ihrer Auswirkungen erfolversprechend anwendbar sind. Eine gute Übersicht über allgemein gebräuchliche Methoden der technologischen Vorausschau, ihre Voraussetzungen und ihre Leistungsfähigkeit geben *Jantsch* [24] und *Gerfin* [25], so daß sich eine weitere Darstellung im einzelnen erübrigt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß im vorliegenden Fall der Prognose der mutmaßlichen Entwicklung der NC-Maschinen und ihrer Auswirkungen versucht wurde, die verschiedensten Prognoseverfahren teils einzeln und teils kombiniert anzuwenden, um so zu einer zusammenhängenden Aussage über möglichst viele Aspekte der Entwicklung zu gelangen. So wurde das im Abschnitt 4.3 gezeichnete Bild der qualitativen Veränderungen bis zu den höchst automatisierten Fertigungssystemen auf der Grundlage der systemtheoretischen Strukturbilder durch eine Analyse der sich heute bereits abzeichnenden technischen Mittel zu ihrer Realisierung gewonnen. Für die Erarbeitung des im folgenden dargestellten quantitativen Modells der Verbreitung heute schon im Einsatz befindlicher NC-Maschinen wurden die Möglichkeiten und Methoden der

- Expertenbefragung,
- Trendextrapolation aufgrund von Zeitreihen,
- Analogieschlüsse,
- Lernkurven,
- Wirtschaftlichkeitsanalyse

im einzelnen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüft und deren Ergebnisse größtenteils in das Modell eingearbeitet.

Mit der im folgenden gegebenen Darstellung wird der Versuch unternommen, ausgehend von

einer Analyse bekanntgewordener empirischer Daten, die die Verbreitung der NC-Maschinen bestimmenden Faktoren — bildlich gesprochen die „treibend und bremsend wirkenden Kräfte“ — in einem mathematischen Modell zu verknüpfen, so daß damit die vergangene Entwicklung hinreichend erklärt und somit eine einigermaßen zuverlässige Prognose der zukünftigen Verbreitung gewonnen werden kann.

5.2 Analyse der empirischen Daten

Die zahlenmäßige Verbreitung von NC-Maschinen — gemessen nach der Zahl der Maschinen sowie nach ihrem Anteil am Gesamtmaschinenpark (nur Produktionsmaschinen) — war bis zum Ende des Jahres 1967 jeweils für alle im Jahre 1968 untersuchten Betriebe genau bekannt (vgl. [1,2]). Dabei zeigte sich in fast allen Fällen ein progressives Anwachsen des Anteils der NC-Maschinen am Gesamtmaschinenpark. In einer Auswahl von fünf dieser Betriebe konnte das weitere Vordringen bis zum Ende des Jahres 1969 exakt und bis Ende 1970 nach den jeweiligen Planzahlen weiterverfolgt werden. Die besondere Wahl dieser Betriebe war einmal gegeben durch ihr zu fertigendes Teilespektrum, das sie zu typischen NC-Anwendern macht, zum anderen dadurch, daß ausreichend Informationen erhältlich waren. Aus Gründen der Vertraulichkeit gegenüber den Firmen wurden die Zahlen der einzelnen Betriebe zusammengefaßt. Das Ergebnis, also die zahlenmäßige Verbreitung der NC-Maschinen über der Zeit, ist in Tafel 5.1 sowohl nach der Zahl der Maschinen als auch nach ihrem Anteil am Maschinenpark dargestellt. Zur Berechnung der relativen Häufigkeit der NC-Maschinen über der Zeit wurde der Maschinenbestand aller produktiven Maschinen aus dem Jahre 1967 in Höhe von 2600 Maschinen als über der Zeit konstant angenommen. Die Zulässigkeit dieser von der Wirklichkeit leicht abweichenden Annahme wird weiter unten noch diskutiert.

Tafel 5.1: Verbreitung der NC-Maschinen in 5 Betrieben des deutschen Maschinenbaus (1970: geplant)

Zeit (Jahr)	Verbreitung von NC-Maschinen	
	Anzahl	%
1962	3	0,1
1963	7	0,3
1964	14	0,5
1965	19	0,7
1966	30	1,2
1967	42	1,6
1968	60	2,3
1969	78	3,0
1970	102	3,9

Dabei zeigt sich auch weiterhin ganz deutlich ein progressives Vordringen der NC-Maschinen; das gilt auch für jeden dieser Betriebe einzeln.

In Bild 5.1 ist die Verbreitung der NC-Maschinen in diesen fünf Betrieben — gemessen in absoluten Zahlen — nochmals in einfach logarithmischem Maßstab aufgetragen. Aus diesem zeitlichen Verlauf läßt sich auf ein nahezu exponentielles Wachstum der Anzahl der NC-Maschinen schließen, jedenfalls für den Beginn der hier dargestellten Entwicklung.

Aus einer Reihe von Veröffentlichungen [26, 27] konnten Daten über die absolute zahlenmäßige Verbreitung von NC-Maschinen über der Zeit in der Bundesrepublik, in Großbritannien und in den USA entnommen werden. Um einen Vergleich zu erleichtern, sind die Ergebnisse in Bild 5.2 zusammengefaßt dargestellt. Auch hier weisen die Kurvenverläufe — ebenfalls in einfach logarithmischem Maßstab aufgetragen — auf ein nahezu exponentielles Wachstum des Einsatzes von NC-Maschinen hin; im Falle der USA ist diese Entwicklung allerdings schon etwas abgeschwächt. Ganz offensichtlich handelt es sich dabei um einen charakteristischen Kurvenverlauf, der es nahelegt, nach einem beschreibenden Gesetz zu suchen, um damit den weiteren Verlauf in der Zukunft zu prognostizieren.

Bild 5.1: Absolute Verbreitung der NC-Maschinen in fünf Betrieben des deutschen Maschinenbaus (1970: geplant)

Quelle: Untersuchung

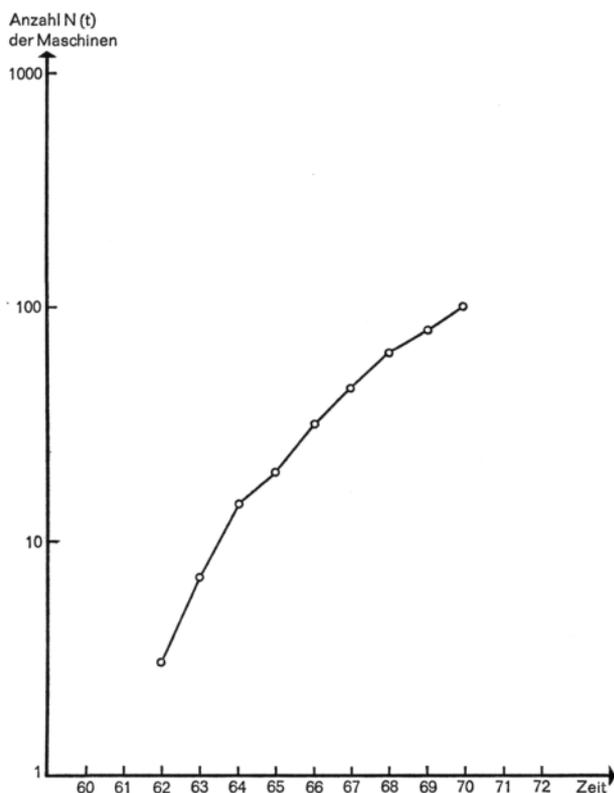
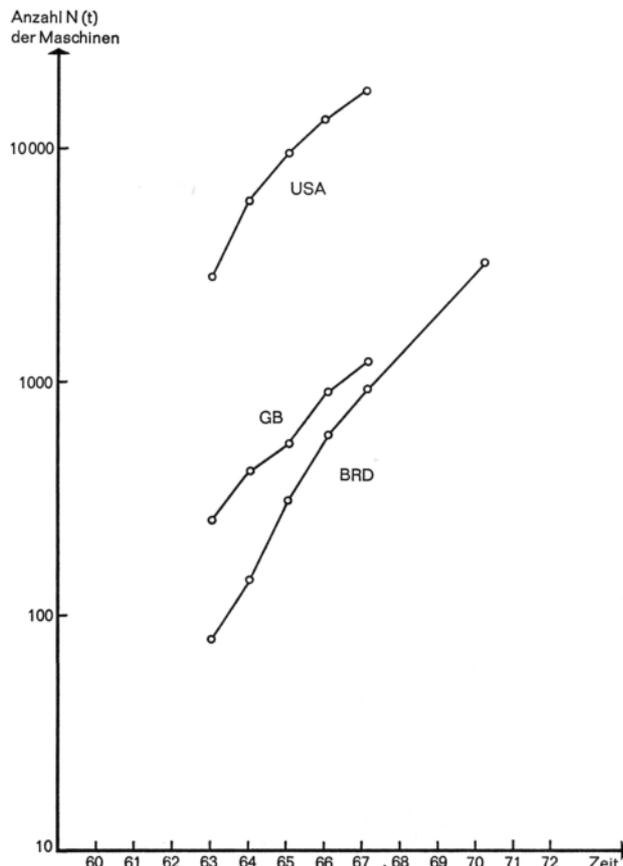


Bild 5.2: Absolute Verbreitung der NC-Maschinen in der BRD, Großbritannien und den USA (1970: geschätzt)

Quelle [26, 27]



Allerdings sei an dieser Stelle bereits auf eine grundsätzliche Gefahr dabei aufmerksam gemacht, wenn man zu schematisch diese sogenannte Methode der Trendextrapolation auf die wenigen bereits vorhandenen Daten anwendet. Werden die Daten der bisherigen Verbreitung von NC-Maschinen allein berücksichtigt, so läßt deren Verlauf über der Zeit den Schluß zu, es handle sich dabei um einen einfachen Wachstumsprozeß, der unter gewissen idealisierten Bedingungen in der Physik und Biologie oft anzutreffen ist: den sogenannten Malthusschen Wachstumsprozeß, der durch die Differential-

$$\frac{dN}{dt} = cN(t); -\infty < c < +\infty \quad (5.1)$$

mit der Lösung

$$N(t) = N_0 e^{ct} \quad (5.2)$$

beschrieben wird.

Nach den folgenden Überlegungen erscheint jedoch eine Entwicklung nach diesem Gesetz als sehr unwahrscheinlich. Zunächst läßt sich nämlich theoretisch eine obere Schranke für die Wachstumsgröße $N(t)$ angeben, die sie auf keinen Fall zu überschreiten vermag. Bekanntlich ist es die Aufgabe der Summe aller produktiven

Fertigungssysteme beispielsweise eines Betriebes — aber auch aller stückgutproduzierenden Betriebe einer Volkswirtschaft zusammen —, das Teilespektrum des einen — aber auch aller Betriebe — zu fertigen, aus dessen einzelnen Teilen sich die jeweiligen Endprodukte zusammensetzen. Das Teilespektrum selbst kann sich hinsichtlich seines Umfangs und des zur Fertigung nötigen Aufwands an Maschinenkapazität mit der Zeit zwar verändern — in der Regel wird der Aufwand in einem gewissen Verhältnis zum Bruttosozialprodukt wachsen —, andererseits aber erhöht sich auch ständig die Produktivität der Fertigungssysteme. Folglich wird sich die Anzahl der Fertigungssysteme, die zur Fertigung des jeweiligen Teilespektrums benötigt werden, mit der Zeit nur sehr langsam verändern, sehr viel langsamer jedenfalls, als das durch Gleichung (5.2) beschriebene Wachstum. Das bedeutet, daß selbst dann, wenn sämtliche bestehenden Fertigungssysteme durch die nach (5.2) beschriebene Verbreitung von NC-Maschinen ersetzt würden, die Entwicklung zu einem plötzlichen Stillstand kommen müßte, wenn die maximal zur Fertigung benötigte Anzahl erreicht ist. Eine Entwicklung dieser Art ist — wie bereits erwähnt — höchst unwahrscheinlich.

Die verfügbaren Daten aus den untersuchten Betrieben, in denen der jeweilige Maschinenpark nach Umfang und Zusammensetzung über 10 Jahre verfolgt werden konnte [1,2], ebenso wie der wertmäßige Nettozuwachs der spanenden Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik (vgl. [28]), zeigen unter Berücksichtigung ausgeschiedener Maschinen sehr deutlich, daß sich die absolute Anzahl von Werkzeugmaschinen tatsächlich mit der Zeit nur langsam verändert, und man begeht dabei keinen großen Fehler, wenn man sie für einen begrenzten Zeitraum als konstant annimmt.

Darüber hinaus muß bedacht werden, daß kaum ein Teilespektrum dazu geeignet ist, insgesamt auf NC-Maschinen wirtschaftlich gefertigt zu werden. Theoretisch müßte sich derjenige Teil eines gegebenen Teilespektrums angeben lassen, für den ein wirtschaftlicher Einsatz von NC-Maschinen möglich ist, sobald das Zuordnungsproblem von Teilen zu Werkzeugmaschinen eindeutig gelöst ist, um daraus die Grenze für die höchstens benötigte Anzahl von NC-Maschinen zu bestimmen. Das ist allerdings zur Zeit noch nicht in allen Einzelheiten möglich, so daß man gezwungen ist, diesen Zusammenhang zunächst nur als Hypothese in die Überlegungen einzuführen.

Da dieser Punkt aber für die im folgenden ausgeführten Betrachtungen von außerordentlicher Bedeutung ist, wurde während der Untersuchung großer Wert darauf gelegt, einigermaßen verlässliche Angaben für diese Sättigungsgrenze des

maximal möglichen Einsatzes von NC-Maschinen zu erhalten. Als Ersatz für den zur Zeit noch nicht eindeutig aus dem Teilespektrum ableitbaren theoretischen Wert wurde daher versucht, durch gezieltes Befragen der jeweils in den einzelnen Betrieben für die Planung und den Einsatz der NC-Maschinen zuständigen Experten diese Sättigungsgrenze zu schätzen. Die entsprechenden Werte sind bereits im Bericht 1968 enthalten. Um diese Werte besser abzusichern, wurden im Laufe der Untersuchungen 1969 die bereits erwähnten fünf Betriebe noch einmal dazu befragt; dabei wurde den Befragten sowohl deren eigene alte Schätzung als auch die der übrigen Befragten zur Kenntnis gegeben. Das Ergebnis ist in der folgenden Tafel 5.2 im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung enthalten.

Tafel 5.2: Geschätzte Sättigungsgrenzen des möglichen Einsatzes von NC-Maschinen (Firmenangaben)

Betrieb Nr.	geschätzte Sättigungsgrenzen (in % der Maschinenzahl)	
	alte Schätzung	neue Schätzung
2	15	Bohren 15...20 Drehen 20...30 Fräsen 10...15 Schleifen 15...20
3	bis 1973 jährlicher Zuwachs von 0,3...0,6	Bohren 15
4		Drehen 10 Fräsen 10
5	25	Bohren 10 Drehen 15 Fräsen 25
7	Bohren 40 Drehen 30 Fräsen 20	Bohren 40 Drehen 30 Fräsen 20

Die daraus ersichtliche Schwankungsbreite der Schätzungen für die einzelnen Betriebe ist nicht nur auf die Unsicherheit der Schätzung zurückzuführen; sie beruht auch auf den durch unterschiedliche Teilespektren gegebenen Verschiedenheiten. Dieser Effekt zeigt sich deutlich in der Aufteilung nach den einzelnen Fertigungsverfahren. Die in ihrem Einfluß unbekannt, verbliebene Unsicherheit der Schätzung überlagert sich dann diesem Effekt. Ferner sei noch bemerkt, daß sich diese Angaben auf Anzahlen von Maschinen beziehen und nicht auf Anteile an der Fertigungskapazität, die in diesem Zusammenhang weniger interessiert. Die höhere Produktivität der NC-Maschinen ist dabei wenigstens schätzungsweise berücksichtigt.

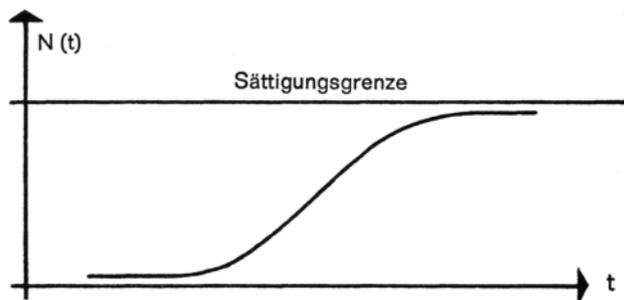
Ausgehend von dieser grundlegenden Annahme, daß eine prinzipielle Sättigungsgrenze für den

möglichen Einsatz von NC-Maschinen besteht, kann die Analyse und Interpretation der Daten über die bisherige Verbreitung von NC-Maschinen in folgender Weise weiterentwickelt und für Prognosezwecke nutzbar gemacht werden: Der empirische Verlauf der Verbreitung über der Zeit zusammen mit der Existenz einer Sättigungsgrenze deutet darauf hin, daß es sich dabei um ein typisches Innovationsphänomen handelt, ähnlich vielen anderen, bereits abgeschlossenen Entwicklungen gleicher Art, in denen sich der technische Wandel dokumentiert. Eine Reihe von Autoren haben sich bereits ausführlich mit empirischen Daten über Innovationen in den verschiedensten Bereichen des technischen Wandels befaßt. So haben beispielsweise

- *Daeves* [29] im Bereich der Rohstoffindustrie die Entwicklung verschiedener Stahlerzeugungsverfahren;
- *Griliches* [30] im Bereich der Landwirtschaft die regionale Verbreitung neuer Getreidezüchtungen in den USA;
- *Lancoud* und *Trachsel* [31] im Dienstleistungssektor die Dichte der Telefonhauptanschlüsse in der Schweiz und in Schweden;
- *Mansfield* [32] in 4 verschiedenen Industriezweigen je 3 technische Neuerungen in den USA

in aller Ausführlichkeit analysiert. Allen dort untersuchten Entwicklungen ist gemeinsam, daß sie sich von einem Einführungszeitpunkt aus nach einem S-förmigen Kurvenverlauf bis auf ein Sättigungsniveau in dem jeweiligen Anwendungsbe- reich verbreitet haben (vgl. Bild 5.3).

Bild 5.3: Typischer Zeitverlauf der Verbreitung technologischer Innovationen



In einer weiteren Arbeit [33] werden vor allem auch die typischen Kennzeichen einer Vielzahl technologischer Innovationen in ihrer zeitlichen Entwicklung von der Erfindung bis zur größten Verbreitung dargelegt und dabei vier Zeitabschnitte — Grundlagenphase, Inventionsphase, Innovationsphase und Diffusionsphase — unterschieden. Demnach kann auch die Entwicklung von NC-Maschinen als technologische Innovation angesehen werden, deren Verlauf etwa 1955 das Ende der Innovationsphase erreicht hat.

Daran schließt sich die durch das oben gegebene Zahlenmaterial belegte, nahezu exponentielle Verbreitung an, die offensichtlich ein Kennzeichen der Diffusionsphase ist. In einer weiteren Untersuchung [34], in der die gegenwärtige Diffusionsphase der Entwicklung der NC-Maschinen im Zusammenhang mit neun weiteren Innovationen in sechs europäischen Ländern untersucht wird, hat sich der näherungsweise exponentielle Zeitverlauf der Verbreitung zu Beginn der Diffusionsphase in allen Fällen abermals bestätigt.

Nach dieser Zwischenbetrachtung kann der oben begonnene Gedankengang im Hinblick auf eine Prognose folgendermaßen weitergeführt werden: Nachdem die Eigenschaften der bisherigen Entwicklung der NC-Maschinen — besonders der spezifische Anfangsverlauf der Diffusionsphase zusammen mit der prinzipiell vorhandenen Sättigungsgrenze — diese als technologische Innovation ausweisen und damit in die Nachbarschaft anderer bereits abgeschlossener Innovationen stellt, läßt sich umgekehrt durch Analogieschlüsse aus deren Entwicklungsverlauf auf die weitere Verbreitung der NC-Maschinen schließen. Damit reduziert sich — die Zulässigkeit dieser Vorgehensweise vorausgesetzt — das Prognoseproblem auf die Aufgabe, eine geeignete S-Kurve dem bisherigen Verlauf anzupassen.

Aus der Menge der Funktionen mit S-förmigem Verlauf zwischen zwei festen Grenzen sind für Prognosezwecke an einzelnen Entwicklungsprozessen des technischen Wandels bevorzugt die

1. Die Gauss'sche Verteilungsfunktion

$$N(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{1}{2}x^2} dx; \quad (5.3)$$

2. die logistische Funktion

$$N(t) = \frac{1}{1 + e^{-(a+bt)}}, \quad (5.4)$$

die beide die Eigenschaft haben, bezüglich ihres Wendepunktes symmetrisch zu sein. Ein Vergleich der beiden Funktionen unter gleichen Nebenbedingungen für die Parameter zeigt, daß sie sich in ihrem Verlauf relativ wenig voneinander unterscheiden und insbesondere in hinreichender Entfernung vom Wendepunkt ungefähr exponentielles Wachstum aufweisen. Ohne weitere theoretische Überlegungen ist es daher ohne Belang, welche der beiden Funktionen man für die Trendextrapolation verwendet. In jedem Fall hat man die noch verfügbaren Parameter der genannten Funktionen aus den Daten des bereits bekannten Verlaufs zu bestimmen.

Wie diese Ausführungen gezeigt haben, läßt sich die darin beschriebene Vorgehensweise prinzi-

piell auch auf den Fall der Verbreitung der NC-Maschinen anwenden. Allerdings bestehen gegen diese Vorgehensweise wichtige Bedenken, da sie vor allem in zwei Punkten nicht befriedigt:

1. Ganz allgemein stützt sich die Methode der Trendextrapolation allein auf die Annahme, daß eine empirisch festgestellte Entwicklung sich nach der gleichen, a priori unbegründeten Gesetzmäßigkeit fortsetzt, nach der sie begonnen hat. Dabei beruht das Vertrauen auf das Zutreffen der durch Trendextrapolation ermittelten zukünftigen Entwicklung auf Analogieschlüssen und Vergleichen mit anderen, in ähnlicher Weise bereits abgelaufenen Entwicklungen.
2. In Fällen, in denen erst wenige Daten am Anfang der Entwicklung bekannt sind, wird zusätzlich die Bestimmung der Parameter der verwendeten Trendfunktion um so unsicherer, je kürzer der schon bekannte Verlauf im Verhältnis zum noch zu prognostizierenden Verlauf ist.

Den ersten Nachteil kann man allerdings aufheben, wenn sich eine Menge von bekannten Größen finden und dazu eine Verknüpfung dieser Größen in einem quantitativen Modell angeben läßt, mit dem man die Entwicklung wenigstens näherungsweise erklären kann. Dann ist nämlich die zu prognostizierende Entwicklung auf eine gewisse Zahl von Ursachen zurückgeführt und aus der Kenntnis des Zusammenspiels dieser Ursachen läßt sich nicht nur die vergangene Entwicklung erklären, sondern auch deren Fortsetzung in der Zukunft voraussagen.

Ein Versuch in diese Richtung wird im folgenden Abschnitt ausführlich dargelegt und auch auf die einzelnen einschränkenden Annahmen und Nebenbedingungen hingewiesen.

5.3 Mathematisches Modell der Verbreitung von NC-Maschinen

5.3.1 Formulierung des Modells

Von den im vorangehenden Abschnitt dargestellten Ergebnissen der Analyse des empirischen Datenmaterials ist für das folgende zunächst die Tatsache von Bedeutung, daß es offensichtlich eine obere Grenze des möglichen Einsatzes von NC-Maschinen in einem gegebenen Anwendungsbereich (Betrieb, Industriezweig, Volkswirtschaft usw.) gibt.

Daher sei die erste grundlegende Annahme getroffen, es gebe eine Sättigungsgrenze für die Anzahl an NC-Maschinen in einem Bereich, diese verändere sich nicht mit der Zeit und sie sei mit m bezeichnet.

Ferner ist die hier interessierende wesentliche Größe die — absolute oder relative — Verbrei-

tung der NC-Maschinen über der Zeit, also die absolute Anzahl im Einsatz befindlicher NC-Maschinen $n(t)$ bzw. die auf den maximal möglichen Einsatz bezogene Dichte $p(t) = n(t)/m$. Wie die folgenden Überlegungen zeigen, läßt sich nun eine Beziehung finden, die den Zuwachs $[n(t + \Delta t) - n(t)]$ an NC-Maschinen in einem gewissen Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ von einer Reihe von noch näher zu spezifizierenden Faktoren abhängig macht.

Ausgehend von der Situation, daß in einem gegebenen Anwendungsbereich ein Bedürfnis für Investitionen vorhanden ist und zu dessen Befriedigung eine Reihe von technischen Möglichkeiten einschließlich einer möglichen Innovation — hier also der NC-Maschine — zur Verfügung stehen, müssen zunächst die Gründe aufgesucht werden, die die Kaufentscheidung beeinflussen und schließlich eine bestimmte Maschine vorteilhafter als alle anderen zur Konkurrenz stehenden erscheinen läßt.

In dieser Situation wird der Entscheidungsträger die Investitionsentscheidung davon abhängig machen, inwieweit sich eine technische Neuerung bereits durchgesetzt hat. Einerseits möchte er nach dem technisch jeweils neuesten Stand investieren, um „den Anschluß nicht zu verpassen“, „Erfahrungen zu sammeln“ usw.; andererseits wird er mit technisch-organisatorischen Schwierigkeiten rechnen, die in ihrer abschreckenden Wirkung jedoch mit zunehmender Verbreitung der Innovation im eigenen oder auch ähnlichen Betrieben nachlassen. Ebenso werden sicherlich auch allgemeine Lernprobleme im personellen Bereich, also Umschulungs- und Ausbildungsfragen mit den daraus resultierenden organisatorischen und personellen Schwierigkeiten in die Überlegungen beim Kaufentscheid eingehen. Nach den Erfahrungen, die im Laufe der Untersuchungen sowohl während der Betriebsbesuche als auch aus der Literatur gesammelt werden konnten, sind dies alles Punkte, die bei Investitionsentscheidungen eine Rolle spielen (vgl. z. B. Abschnitt 3, [19, 32]). Das bedeutet, daß Risiko und Unsicherheit über die technische und wirtschaftliche Bewährung der technischen Neuerung abnehmen, je weiter sie bereits verbreitet ist, und ihr Vorteil gegenüber vergleichbaren konventionellen Investitionen wird in diesem Maße wachsen.

So soll die zweite grundlegende Annahme getroffen werden, daß die Bereitschaft, in einem gewissen Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ die Kaufentscheidung genau einmal zugunsten der Innovation zu fällen, d. h. hier, genau eine NC-Maschine anzuschaffen, von der bereits zur Zeit t vorhandenen Dichte $p(t)$ der Innovation abhängt.

Weitere Überlegungen zur Investitionsentscheidung gelten der Wirtschaftlichkeit und den Inve-

stitionsausgaben (vgl. Abschnitt 2 und 3). Ist nämlich von zwei alternativ betrachteten Investitionen eine die wirtschaftlichere, so fällt die Entscheidung zu ihren Gunsten — vorausgesetzt, beide erfordern die gleiche Investitionssumme. Sind dagegen zwei Investitionen gleich wirtschaftlich, so wird sich der Entscheidungsträger für diejenige mit den geringeren Investitionsausgaben entscheiden. So wird ein Investor um so größere Bereitschaft zeigen, zugunsten einer Innovation zu entscheiden, je wirtschaftlicher und je weniger aufwendig sie im Vergleich zu den anderen Möglichkeiten zu sein verspricht. Um nun diese Größen — Wirtschaftlichkeit und Investitionsausgaben — quantitativ in das Modell einzuführen, sind sie zweckmäßigerweise dimensionslos zu machen. Dazu seien die absoluten Größen jeweils bezogen auf die entsprechenden Werte, die zu einer der alternativen Investitionen — im Falle der NC-Maschinen also etwa zu einer vergleichbaren konventionellen Werkzeugmaschine — gehören. Diese bezogene Wirtschaftlichkeit sei mit w , die bezogene Investitionssumme mit s bezeichnet.

Demnach lautet die dritte grundlegende Annahme, daß die Bereitschaft, in einem gewissen Zeitintervall Δt genau eine NC-Maschine anzuschaffen, von der bezogenen Wirtschaftlichkeit w und der bezogenen Investitionssumme s abhängt, wobei w und s als zeitlich konstant vorausgesetzt werden.

Ausgehend von der ersten Annahme, daß eine Sättigungsgrenze m existiert, können zu einer gewissen Zeit t höchstens noch $m - n(t)$ Entscheidungen zugunsten der Innovation getroffen werden, d. h. hier, es können zur Zeit t höchstens noch $m - n(t)$ NC-Maschinen angeschafft werden. Tatsächlich beträgt der Zuwachs an NC-Maschinen in dem Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ jedoch nur $n(t + \Delta t) - n(t)$ Einheiten. Folglich ist die tatsächliche Bereitschaft, in diesem Zeitintervall genau eine der $m - n(t)$ möglichen NC-Maschinen anzuschaffen, gerade $[n(t + \Delta t) - n(t)] / [m - n(t)] \Delta t$.

Faßt man nun die oben angestellten Überlegungen und die daraus resultierende zweite und dritte Annahme zusammen, so erhält man damit für die Bereitschaft, im Zeitintervall $[t, t + \Delta t]$ aus der Menge der $m - n(t)$ möglichen Innovationseinheiten genau eine Einheit zu investieren, die grundlegende Beziehung

$$\frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{[m - n(t)] \Delta t} = f(p(t), w, s). \quad (5.5)$$

Es sei hier angemerkt, daß dabei nur die grundsätzliche Abhängigkeit der Investitionsbereitschaft zugunsten einer Innovation von der Dichte, der Wirtschaftlichkeit und den Investitionsausgaben gefordert wird, dagegen jedoch offengelassen ist, wie die Größen untereinander im ein-

zelnen in Beziehung stehen. Die Funktion f ist im einzelnen nicht bekannt; es sei lediglich vorausgesetzt, daß sie gewisse mathematische Eigenschaften besitze, insbesondere durch eine Taylor-Entwicklung approximierbar sei. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß der den vorangegangenen Überlegungen zugrunde liegende Entscheidungsprozeß mit erheblichen Unsicherheiten infolge mangelnder Kenntnisse der Entscheidungsträger über die tatsächlichen Verhältnisse belastet ist. Wäre die Entscheidungssituation in allen Einzelheiten bekannt, so läge damit auch die Funktion f im einzelnen fest.

Die unbekannte Funktion (5.5) sei nun in eine Taylor-Reihe entwickelt:

$$f(p(t), w, s) = a_0 + a_1 p(t) + a_2 w + a_3 s + a_4 w p(t) + a_5 s p(t) + a_6 w s + a_7 p^2(t) + a_8 w^2 + a_9 s^2 + \dots \quad (5.6)$$

Für das folgende ist es entscheidend wichtig, die Koeffizienten von $p(t)$, $p^2(t)$, ... zu kennen. Eine diesbezügliche Analyse der vorhandenen Daten deutet darauf hin, daß bereits der Koeffizient von $p^2(t)$, $a_7 = 0$, und damit auch alle Glieder höherer Ordnung in $p(t)$ Null sind (vgl. Bild 5.4). Setzt man für das weitere voraus, daß dies tatsächlich der Fall ist, so erhält man aus (5.6) die folgende Darstellung, in der alle Koeffizienten von $p(t)$ und alle Glieder ohne $p(t)$ zusammengefaßt sind:

$$f(p(t), w, s) = cp(t) + k \quad (5.7)$$

mit

$$c = a_1 + a_4 w + a_5 s + \dots \quad (5.8)$$

$$k = a_0 + a_2 w + a_3 s + a_6 w s + a_8 w^2 + a_9 s^2 + \dots \quad (5.9)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (5.5) ergibt sich so die grundlegende Differenzgleichung

$$n(t + \Delta t) = n(t) + [m - n(t)] \cdot [k + cp(t)] \cdot \Delta t, \quad (5.10)$$

die unter den genannten Voraussetzungen die absolute Verbreitung einer Innovation über der Zeit vollständig beschreibt.

Für die weiteren Überlegungen ist es jedoch nützlich, die Annahme einzuführen, daß sich die Zahl der Einheiten einer Innovation kontinuierlich verändern kann, eine Annahme, die natürlich nur näherungsweise zutrifft. Dann geht die Differenzgleichung (5.10) über in die Differentialgleichung

$$\frac{d}{dt} n(t) = [m - n(t)] [k + cp(t)], \quad (5.11)$$

die sich unter Berücksichtigung von $p(t) = n(t)/m$ auch in der Form

$$\frac{d}{dt} p(t) = [1 - p(t)] [k + cp(t)] \quad (5.12)$$

mit der Dichte $p(t)$ als relativer Verbreitung schreiben läßt.

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$p(t) = \frac{e^{c_0 + (k+c)t} - \frac{k}{c}}{1 + e^{c_0 + (k+c)t}} \quad (5.13)$$

Verfolgt man nun den Verlauf der Dichte $p(t)$ in der Zeit rückwärts, so muß es irgendeinen Zeitpunkt in der Vergangenheit geben, zu dem die Dichte Null war, d. h. es muß die Bedingung gelten, daß

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} p(t) = 0. \quad (5.14)$$

Daraus folgt unmittelbar, daß

$$k = a_0 + a_2w + a_3s + \dots = 0, \quad (5.15)$$

und man erhält als endgültige Lösung für die Differentialgleichung (5.12) die Beziehung

$$p(t) = \frac{1}{1 + e^{-(c_0 + ct)}} \quad (5.16)$$

mit einer Integrationskonstanten c_0 , die die Lage der Funktion $p(t)$ bezüglich der Zeitachse festlegt. Ein Vergleich mit (5.4) zeigt, daß aus diesem Modell gerade die logistische Funktion als Beschreibung der zeitlichen Verbreitung von NC-Maschinen hervorgeht. Der Wachstumsprozeß während der Diffusionsphase wird dabei im wesentlichen durch den Parameter c nach Gleichung (5.8) bestimmt.

Zu einem der Struktur nach gleichen Modell gelangen auch *Lancoud* und *Trachsel* [31] sowie *Mansfield* [32]. Im Falle der Verbreitung von Telefon-Hauptanschlüssen [31] spielen Wirtschaftlichkeitsüberlegungen naturgemäß nur eine untergeordnete Rolle, während die bereits installierte Zahl von Hauptanschlüssen den Nutzen für einen potentiellen Fernsprechteilnehmer im Sinne größerer Kommunikationsmöglichkeiten wesentlich bestimmen. Daher werden in diesem Modell die Größen w und s nicht explizit eingeführt; das Ergebnis ist jedoch ebenfalls eine logistische Funktion, deren Parameter c sich aus der subjektiven „Attraktion“ für den Besitz eines Telefon-Hauptanschlusses ergibt.

Mansfield [32] verwendet in seiner Untersuchung 12 verschiedener Innovationen als Maß für deren Verbreitung die Zahl der Betriebe, die die jeweilige technische Neuerung bis zur Zeit t bereits eingeführt haben. Im übrigen werden in diesem Modell die gleichen Größen $p(t)$, w , s — wenngleich auch mit einem teilweise etwas anderen Bezug — als wesentliche Einflußfaktoren eingeführt. Aus dem dabei zugrunde liegenden Zahlenmaterial ging hervor, daß weitere Faktoren kaum, jedenfalls keinen statistisch signifikanten Einfluß auf die Verbreitung einer technischen Neuerung haben. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt auch *Griliches* [30] in seiner Untersuchung neuer Getreidezüchtungen in den USA.

So scheint es zu genügen, nur die genannten Größen explizit in dem Modell zu berücksichtigen und den Einfluß etwa doch noch vorhandener weiterer Faktoren zusammen mit dem durch den Abbruch der Taylor-Entwicklung (5.6) entstandenen Fehler in einem allgemeinen Fehlerglied r gemäß

$$c = a_1 + a_4w + a_5s + r \quad (5.17)$$

zusammenzufassen. Sofern nämlich die Annahme zutrifft, daß sämtliche Koeffizienten der Glieder von (5.6), die $p^n(t)$ mit $n \geq 2$ enthalten, Null sind, lassen weitere Faktoren, die die Entwicklung möglicherweise beeinflussen könnten, ohnehin die Struktur des Modells unverändert und gehen lediglich in die Parameter k und c ein. Aus den Untersuchungen [30, 31, 32] ebenso wie aus dieser geht jedoch hervor, daß diese Annahme fast immer erfüllt ist und offensichtlich geradezu ein Kennzeichen der zeitlichen Verbreitung gewisser technischer Neuerungen in der Diffusionsphase ist.

Damit lassen sich die hier angestellten Überlegungen zu der Behauptung zusammenfassen, daß es eine Klasse von Innovationen in den verschiedensten Bereichen volkswirtschaftlicher Güter (Rohstoffe, Landwirtschaft, Investitionsgüter, langlebige Konsumgüter, Kommunikation und Verkehr) mit dem Kennzeichen gibt, sich während der Diffusionsphase nach Gleichung (5.10) — bzw. näherungsweise gemäß (5.16) — zu verbreiten und daß die NC-Maschine als technische Neuerung zu dieser Klasse gehört. Dabei liegt die grundlegende Abhängigkeit (5.5) für alle Innovationen gleichermaßen fest, während die Funktion f selbst im einzelnen von Innovation zu Innovation verschieden ist.

5.3.2 Anpassung der Modellparameter an empirische Daten

Für die Bestimmung der Parameter k und c des im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Modells aus dem vorhandenen Datenmaterial stehen grundsätzlich zwei Wege offen. Erstens besteht die Möglichkeit, diese nach den Beziehungen (5.8) und (5.9) direkt zu berechnen und dann in den Gleichungen (5.10) bzw. (5.16) zu verwenden. Diese Vorgehensweise würde jedoch die Kenntnis der Koeffizienten a_i , $i = 0, 1, \dots$, voraussetzen. Das vorhandene Zahlenmaterial reicht aber bedauerlicherweise nicht aus, diese Koeffizienten gegenwärtig verlässlich genug zu bestimmen.

Daher soll im folgenden die zweite Möglichkeit ausgeschöpft werden, die Gleichungen (5.10) bzw. (5.16) insgesamt dem bisherigen Verlauf der Verbreitung der NC-Maschinen anzupassen, um so die Parameter indirekt zu gewinnen. Diese Vorgehensweise, die formal der reinen Trendextrapolation gleicht, geht jedoch über diese hinaus dadurch, daß hier a priori eine theoretische Be-

gründung für den prinzipiellen Verlauf der Entwicklung gegeben ist.

Auf diese Weise sollen im folgenden die beiden die Verbreitung der NC-Maschinen beschreibenden Beziehungen (5.10) und (5.16) untersucht werden. Welcher der beiden Gleichungen man den Vorzug gibt, ist relativ belanglos; zwar wird die Gleichung (5.10) die Entwicklung zweifellos wirklichkeitsnäher beschreiben, dafür bietet die Darstellung nach (5.16) für theoretische Überlegungen Vorteile, wenn sie auch wegen der Voraussetzung kontinuierlichen Wachstums von $n(t)$ nur näherungsweise zutrifft.

Aus (5.10) folgt unmittelbar die Beziehung

$$\frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{m - n(t)} = \left[k + \frac{c}{m} n(t) \right] \Delta t, \quad (5.18)$$

die für ein festes Δt (beispielsweise $\Delta t = 1$ Jahr) eine lineare Regression mit den unbekannt

Konstanten k und $\frac{c}{m}$ definiert.

Aus (5.16) folgt mit $p(t) = n(t)/m$ zunächst für die absolute Verbreitung

$$n(t) = \frac{m}{1 + e^{-(c_0 + ct)}} \quad (5.19)$$

und daraus die Beziehung

$$\ln \frac{n(t)}{m - n(t)} = c_0 + ct, \quad (5.20)$$

die ebenfalls für gegebene Zeitpunkte t eine lineare Regression mit den unbekannt

Konstanten c_0 und c definiert. Mit Hilfe dieser beiden linearen Regressionen wurden die noch offenen Konstanten aus den bisher vorhandenen Daten bestimmt und für die im folgenden Abschnitt dargestellten quantitativen Prognosen verwendet.

Für ein besseres Verständnis der Zusammenhänge der verschiedenen Faktoren, die diese Entwicklung während der Diffusionsphase beeinflussen, wäre es jedoch wünschenswert, sobald erst einmal genügend Daten zur Verfügung stehen, eine gezielte Repräsentativerhebung durchzuführen, um aus dem dabei gewonnenen Zahlenmaterial die Parameter direkt aus den Gleichungen (5.8) und (5.9) zu bestimmen. In diesem Zusammenhang können die Überlegungen in den Abschnitten 2 und 3 dieses Berichts von Nutzen sein und dabei als theoretische Grundlage Verwendung finden. Dabei dürften quantitative Angaben bezüglich der Investitionsausgaben relativ leicht zu beschaffen sein, während es aus den dort dargelegten Gründen sehr schwierig ist, die Wirtschaftlichkeit von NC-Maschinen zahlenmäßig zu fassen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erschien diese Analyse jedenfalls noch nicht als sinnvoll.

5.4 Quantitative Prognose der mutmaßlichen Verbreitung von NC-Maschinen

5.4.1 Verbreitung in einzelnen Betrieben der Untersuchung

Als Grundlage der quantitativen Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen kann zunächst das Datenmaterial der bereits mehrfach erwähnten Auswahl von 5 Betrieben der Untersuchung nach Tafel 5.1 und 5.2 dienen. Daraus ist als erster Schritt die Sättigungsgrenze des maximal möglichen Einsatzes von NC-Maschinen in diesen 5 Betrieben zu bestimmen. Aus den nach verschiedenen Fertigungsverfahren j , $j = 1, \dots, 4$, aufgegliederten Schätzwerten in den einzelnen Betrieben i , $i = 1, \dots, 5$, für die relativen Sättigungsgrenzen m_{ij}^+ und den aus der Untersuchung bekannten absoluten Häufigkeiten H_{ij} von Maschinen des Fertigungsverfahrens j im Betrieb i läßt sich die Sättigungsgrenze m für den gesamten Einsatzbereich aller 5 Betriebe zusammen nach der Beziehung

$$m = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 H_{ij} m_{ij}^+ \quad (5.21)$$

recht genau abschätzen. Unter Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Schätzungen, insbesondere bezüglich des Einsatzes numerischer Steuerungen auf dem Gebiet des Schleifens, ergibt sich damit insgesamt eine Sättigungsgrenze von $m = 400 \dots 520$ NC-Maschinen für die ge-

Bild 5.4: Lineare Regressionen nach Gleichung (5.18) mit $m = 400$ und $m = 520$ für fünf Betriebe

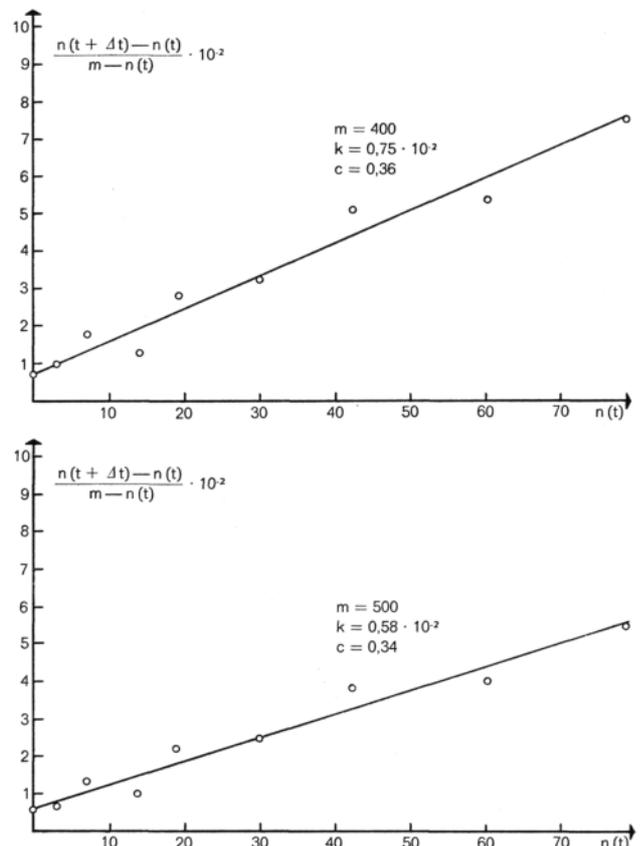
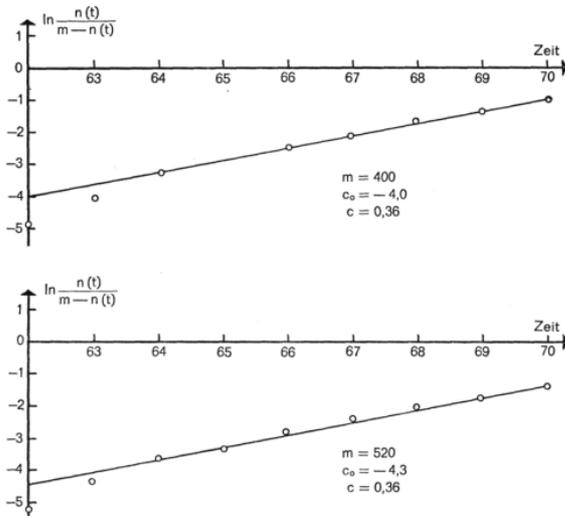


Bild 5.5: Lineare Regressionen nach Gleichung (5.20) mit $m = 400$ und $m = 520$ für fünf Betriebe



nannten 5 Betriebe. Bezogen auf die insgesamt in diesen Betrieben vorhandenen 2600 produktiven Werkzeugmaschinen entsprechen diese Werte einer relativen Sättigungsgrenze von $m^+ = 15 \dots 20 \%$. Mit diesen beiden Werten für die Sättigungsgrenze und den Daten aus Tafel 5.1 lassen sich nun die beiden linearen Regressionen (5.18) und (5.20) berechnen. Das Ergebnis ist in den Bildern 5.4 und 5.5 dargestellt.

Die Geradensteigungen bilden den für das Modell wesentlichen Parameter c ab, der die Verbreitung der NC-Maschinen während der Diffusionsphase hauptsächlich bestimmt; er ergibt sich zu $c = 0,36$. Die Konstante k nimmt auch im Falle der Darstellung durch die Differenzengleichung sehr kleine Werte in der Größenordnung zwischen 10^{-3} und 10^{-2} an, während sie in der Darstellung durch die Differentialgleichung Null ist. Die Integrationskonstante c_0 in dieser Darstellung bestimmt lediglich die Lage der logi-

Bild 5.6: Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen in fünf Betrieben nach Gleichung (5.10)

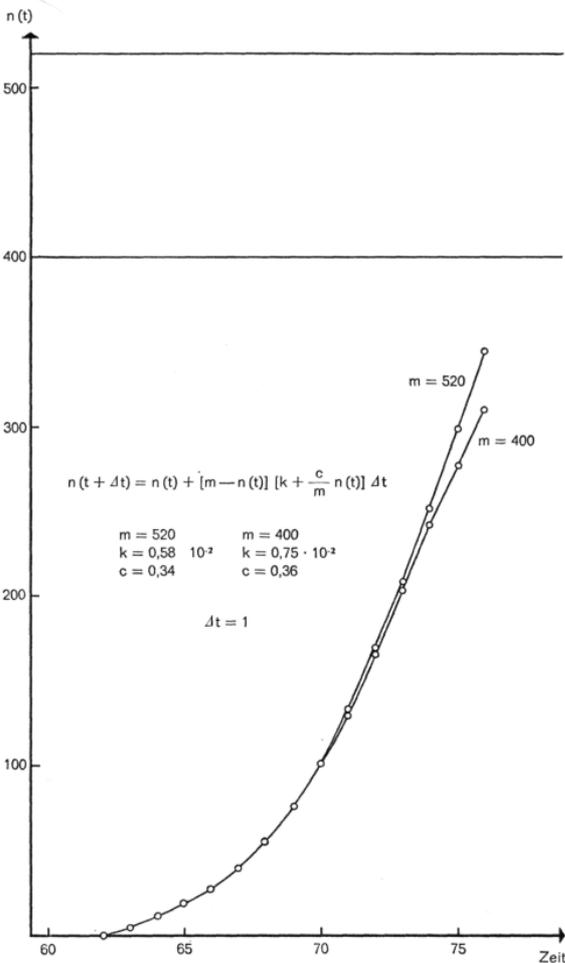
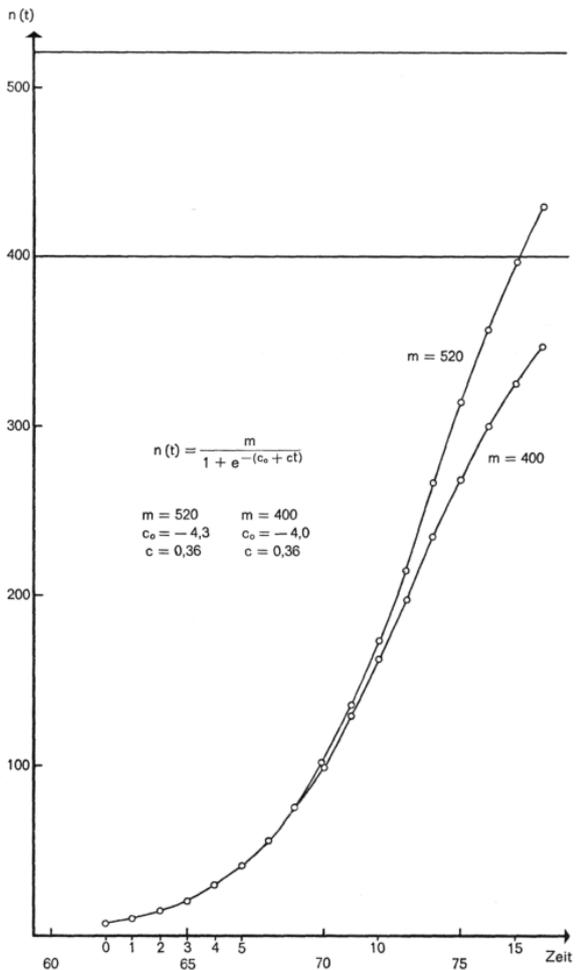


Bild 5.7: Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen in fünf Betrieben nach Gleichung (5.19)



stischen Funktion bezüglich des gewählten Zeitmaßstabes. Mit diesen Werten läßt sich jetzt die absolute Verbreitung der NC-Maschinen über der Zeit für die genannten 5 Betriebe insgesamt nach den Gleichungen (5.10) und (5.19) berechnen. Das Ergebnis ist in den Bildern 5.6 und 5.7 mit jährlichen Zeitintervallen für die Sättigungsgrenze $m = 400$ und $m = 520$ dargestellt.

Es zeigt sich, daß die Kurvenverläufe in allen Fällen recht genau mit dem bekannten bisherigen Verlauf der Verbreitung bis zum Jahr 1970 übereinstimmt (vgl. Bild 5.1 und Tafel 5.1). Naturgemäß wird die Entwicklung realistischer und genauer durch die Differenzgleichung (5.10) beschrieben; dieser Umstand drückt sich auch in der geringeren Streubreite des Kurvenverlaufs bei veränderter Sättigungsgrenze aus. Parameteränderungen haben wegen der Annahme kontinuierlichen Wachstums einen größeren Einfluß auf den durch die logistische Funktion beschriebenen Verlauf als bei der Darstellung durch die Differenzgleichung. Darüber hinaus müssen die Anfangswerte der Entwicklung im Falle der Beschreibung durch die logistische Funktion mehr oder weniger vernachlässigt werden, da letztere sich nur asymptotisch der Nulllinie nähern kann und daher die wirklichen Werte zwangsläufig tiefer liegen (vgl. dazu Bild 5.5).

Im übrigen wird die Verbreitung durch beide Darstellungen gleichermaßen beschrieben, insbesondere ergibt sich die Lage des Wendepunktes, nachdem der jährliche Zuwachs an NC-Maschinen wieder abnimmt, bei einer Sättigungsgrenze von 400 NC-Maschinen für das Jahr 1973 und bei einer Sättigungsgrenze von 520 NC-Maschinen für das Jahr 1974. Demnach dürfte die Verbreitung für $m = 400$ im Jahre 1979 und für $m = 520$ im Jahre 1980 etwa 90% der Sättigungsgrenze erreichen. Das bedeutet, daß zum gegenwärtigen Zeitpunkt (Ende 1969) die Entwicklung gerade in die Phase größten jährlichen Zuwachses an NC-Maschinen eintritt.

Für das Jahr 1967 konnten durch die Untersuchung in 8 Betrieben 67 NC-Maschinen festgestellt werden (vgl. [1,2]); das entspricht 1,7% des entsprechenden produktiven Maschinenparks. Im Vergleich dazu waren zur gleichen Zeit in den hier ausgewählten 5 Betrieben 1,6% des gesamten produktiven Maschinenparks NC-Maschinen. Damit kann die Verbreitung in diesen 5 Betrieben als der Entwicklung in den übrigen Betrieben zumindest sehr ähnlich angesehen werden. Im Jahre 1970 wird die Verbreitung nach den Planungen der 5 Betriebe 102 NC-Maschinen und damit entsprechend 4 % des Maschinenparks erreicht haben.

5.4.2 Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland

Ganz im Gegensatz zu der im vorangegangenen Abschnitt am Beispiel von 5 Betrieben darge-

stellten Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen auf der Grundlage des oben beschriebenen mathematischen Modells erweist sich eine ähnliche Prognose für den Bereich der Bundesrepublik als äußerst schwierig und unsicher, da wesentliche für das Modell benötigte Daten unbekannt sind und daher auf die eine oder andere Weise grob geschätzt werden müssen.

Die größten Schwierigkeiten bereitet schon die Bestimmung der Sättigungsgrenze für den maximal möglichen Einsatz von NC-Maschinen in der Bundesrepublik. Zwar ließe sich deren Bestimmung überhaupt umgehen, indem man den wesentlichen, die Entwicklung kennzeichnenden Wert des Parameters c aus dem vorigen Abschnitt unter der Voraussetzung übernimmt, daß die Wirtschaftlichkeitsverhältnisse der diesem Zahlenwert zugrunde liegenden 5 Betriebe als repräsentativ für die gesamte Einzel- und Kleinserienfertigung in der Bundesrepublik angesehen werden können. Dann ließen sich nämlich aus zwei beliebigen, aus Gründen der Genauigkeit jedoch möglichst weit auseinander liegenden Punkten auf der Kurve der bisherigen Verbreitung der noch unbekannte Parameter c_0 in Gleichung (5.19) und damit auch die Sättigungsgrenze m berechnen. Diese Möglichkeit mußte jedoch wieder verworfen werden, da sich so bereits mit kleinsten Änderungen der Werte am Anfangsverlauf der Verbreitung nahezu beliebige Werte für die Sättigungsgrenze erzeugen lassen. Das bislang bekannte Zeitintervall der Entwicklung erweist sich somit als viel zu kurz, um auf diese Weise eine einigermaßen zuverlässige Schätzung der Sättigungsgrenze zu gewinnen; dieser Weg läßt sich wahrscheinlich erst beschreiten, wenn der Verlauf der Verbreitung bis in die Nähe des Wendepunktes bekannt ist, weil sich dann kleine Fehler am Anfang des Kurvenverlaufs erheblich schwächer bemerkbar machen.

Angesichts dieses Umstandes mußte versucht werden, wenigstens eine grobe Schätzung der Sättigungsgrenze auf anderen Wegen zu erhalten. Bei Kenntnis der Sättigungsgrenze ließe sich dann im wesentlichen auf gleiche Weise wie im vorigen Abschnitt eine Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen in der Bundesrepublik gewinnen, allerdings mit der zusätzlichen Bedingung, daß der Wert für den Parameter c in der Nähe von 0,36 wie im Falle der oben beschriebenen Entwicklung im Bereich der 5 Betriebe liegen muß. Diese Zusatzbedingung ergibt sich aus theoretischen Überlegungen anhand von Gleichung (5.17): Der Wert der bezogenen Investitionssumme s muß naturgemäß für jeden beliebigen Anwendungsbereich gleich sein; lediglich der Wert der bezogenen Wirtschaftlichkeit w sowie des Fehlergliedes r kann von Anwendungsbereich zu Anwendungsbereich noch

gewissen Änderungen unterliegen. Ein Vergleich der Bilder 5.1 und 5.2 zeigt, daß die Verbreitungsgeschwindigkeit (jährlicher Zuwachs an NC-Maschinen) im Bereich der Bundesrepublik etwas größer als im Falle der 5 Betriebe ist, was auf einen etwas größeren Wert von c schließen läßt. Allerdings liegen dabei genaue Zahlen erst bis zum Jahre 1967 vor und die Schätzung für das Jahr 1970 ist bislang noch unbestätigt; sie erscheint, gemessen an der Entwicklung in den oben betrachteten 5 Betrieben, zumindest als sehr hoch. Unter Berücksichtigung dieser Unsicherheit und des Ergebnisses des vorigen Abschnitts, das einen Wert von $c = 0,36$ erbrachte, erscheint es angemessen, für die Verbreitung der NC-Maschinen in der Bundesrepublik einen Parameter von $c = 0,40$ zugrunde zu legen.

Für die verbleibende Schätzung der Sättigungsgrenze kann von zwei Punkten ausgegangen werden: von der Zahl der spanenden Werkzeugmaschinen einerseits und von der Zahl der in der Kleinserienfertigung beschäftigten Arbeiter andererseits. Wären diese Zahlen bekannt, so ließe sich daraus unter Berücksichtigung gewisser Abschläge für Nebenarbeiten, Lagerhaltung, Transport, Montage u. a. m. eine recht gute Schätzung für die Sättigungsgrenze unter der Annahme gewinnen, daß etwa 15 bis 20 % der für die reine Fertigung von Teilespektren verbleibenden Maschinen bzw. Arbeitskräfte dem maximal möglichen Einsatz von NC-Maschinen entsprechen (vgl. Abschnitt 5.4.1).

Die Zahl der spanenden Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik ließ sich aus den vorhandenen statistischen Quellen weder direkt noch indirekt mit genügender Sicherheit ermitteln. Dagegen konnte auf dem Wege über die Zahl der Arbeitskräfte wenigstens eine überschlägige Schätzung für die Sättigungsgrenze ermittelt werden, da die hierzu vorliegende Statistik fein genug gegliedert ist, um den für den Einsatz von NC-Maschinen in Frage kommenden Fertigungsbereich bezüglich der Arbeitskräfte genügend scharf eingrenzen zu können. Nach der Volks- und Berufszählung vom 6.6. 1961 (vgl. [35]) gab es in allen Wirtschaftszweigen der Bundesrepublik zusammen rund 500000 Metallspanabnehmer. Rechnet man davon diejenigen ab, die in Wirtschaftszweigen mit überwiegend Massenfertigung — darunter Eisen- und Stahlerzeugung, NE-Metallerzeugung, Straßenfahrzeugbau — beschäftigt waren, so verbleiben rund 380000 Arbeitskräfte. Unsicher bleibt dabei zumindest der Anteil der ausgesprochenen Massenfertigung an den in dieser Zahl enthaltenen Wirtschaftszweigen Maschinenbau (z. B. Kugellagerfertigung) und Elektrotechnik (z. B. Elektromotorenfertigung), der diese Zahl weiter verringern würde. Von den übrigen Berufsgruppen kommen jedoch noch die Werkzeugmacher für den Einsatzbe-

reich von NC-Maschinen in Frage, deren Anteil in einigen Wirtschaftszweigen die oben genannte Zahl wieder erhöhen würde. Um wenigstens eine Größenordnung für den möglichen Einsatz von NC-Maschinen festzulegen, soll angenommen werden, daß sich die beiden letzteren Verschiebungen ungefähr ausgleichen und daß weiter etwa 15 bis 20% der auf diese Weise verbleibenden 380 000 Bediener spanender Werkzeugmaschinen der Sättigungsgrenze für den maximal möglichen Einsatz von NC-Maschinen entsprechen. Zwar gehen aus dem Gesagten die erheblichen Unsicherheiten, mit denen dieser Schätzwert belastet ist, zur Genüge hervor, andererseits erschien dieser Weg als einzige Möglichkeit, überhaupt einen brauchbaren Zahlenwert zu finden und damit zu einer quantitativen Prognose zu gelangen.

Setzt man einmal voraus, daß die so bestimmten Werte für den Parameter $c = 0,40$ und die Sättigungsgrenze $m = 57\ 000 \dots 76\ 000$ NC-Maschinen einigermaßen zutreffend sind, und nimmt man den letzten noch genau bekannten Verbreitungswert $n(1967) = 940$ als Ausgangspunkt der Berechnung der weiteren Verbreitung nach Gleichung (5.19), so ergibt sich die in Tafel 5.3 dargestellte Entwicklung.

Tafel 5.3: Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen in der Bundesrepublik Deutschland nach Gleichung (5.19)

Zeit (Jahr)	$n(t)$ für $m = 57\ 000$	$n(t)$ für $m = 76\ 000$	tatsächliche Entwicklung
1962	128	128	—
1964	284	284	140
1966	630	630	600
1967	940	940	940
1968	1 385	1 390	—
1969	2 030	2 050	—
1970	2 990	3 010	3 300 (geschätzt)
1971	4 320	4 370	
1972	6 230	6 390	
1973	8 830	9 180	
1974	12 250	12 900	
1975	16 500	17 700	
1976	21 800	24 100	
1977	27 400	30 900	
1978	33 100	38 700	
1979	37 000	44 200	

Daraus ist ersichtlich, daß eine relativ kurzfristige Prognose (etwa bis zum Jahre 1972) weitgehend unabhängig von der Höhe der Sättigungsgrenze Verbreitungswerte liefert, die wesentlich durch den Parameter c bestimmt sind, während sich längerfristig neben der Unsicherheit in c mehr und mehr auch ein Fehler in m bemerkbar macht. Diese Einschränkungen und Unsicherheiten müssen daher für weitere Folgerungen stets

beachtet werden. Eine genauere Prognose wird sich erst stellen lassen, wenn die tatsächliche Verbreitung der NC-Maschinen in der Bundesrepublik über ein längeres Zeitintervall bekannt ist. Das wenigstens näherungsweise Zutreffen dieser Prognosewerte einmal vorausgesetzt, ergibt sich aus diesen Zahlen, daß die Verbreitung von NC-Maschinen in der Bundesrepublik gegenüber der Entwicklung im Bereich der im vorangehenden Abschnitt untersuchten 5 Betriebe erheblich zurückliegt. Dieser Umstand war von vornherein zu erwarten und kann als Indiz dafür gewertet werden, daß diese Prognose wenigstens in Ansatz und für nicht zu weit in die Zukunft reichende Zeiträume zutrifft. Der Wendepunkt der Entwicklung für die Bundesrepublik liegt demnach etwa 4 bis 5 Jahre später als im Falle der 5 Betriebe und muß etwa für die Jahre 1977/78 erwartet werden. Wenn auch nach dem oben gesagten die Prognose für die fernere Zukunft mit großen Unsicherheiten belastet ist, so kann nach Tafel 5.3 doch geschlossen werden, daß mit diesen Zahlen die Verbreitung der NC-Maschinen in der Bundesrepublik etwa bis zum Jahre 1972 relativ unabhängig von der Höhe der Sättigungsgrenze und damit einigermaßen zutreffend prognostiziert werden kann.

5.5 Zusammenfassung der prognostischen Betrachtungen

Die Analyse der empirischen Daten über die bisherige Verbreitung von NC-Maschinen in verschiedenen Anwendungsbereichen in Verbindung mit den Überlegungen zu dem prinzipiellen Vorhandensein einer Sättigungsgrenze ergab zunächst, daß es sich bei dem Vordringen numerisch gesteuerter Fertigungssysteme mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen Prozeß technischen Wandels handelt, der ähnlich der Verbreitung auch anderer technologischer Innovationen im Prinzip nach einem S-förmigen Verlauf einem Sättigungswert der Anwendung zustrebt. Ebenso wie dieser prinzipielle Verlauf der Entwicklung kann auch das theoretische, an bereits abgeschlossenen analogen Prozessen technischen Wandels verifizierte Modell zur Erklärung dieses besonderen Verlaufs als in hohem Grade zutreffend angesehen werden, so daß damit eine sowohl auf theoretischen Überlegungen wie auf dem damit hinreichend erklärten und durch Daten belegten Anfangsverlauf der Entwicklung fußende Prognose möglich ist.

Größere Unsicherheiten für die zahlenmäßige Prognose treten erst mit den im einzelnen zu treffenden Annahmen, insbesondere mit der Schätzung für die Sättigungsgrenze des Einsatzes von NC-Maschinen auf. Während die zahlenmäßige Prognose im Bereich der 5 untersuchten Betriebe aufgrund der wesentlich detaillierteren und besser gesicherten Daten noch rela-

tiv hohes Zutrauen genießen kann, ist diese für den Bereich der Bundesrepublik aufgrund der nur wenigen verfügbaren Daten und der erheblichen Unsicherheiten bezüglich der Sättigungsgrenze wesentlich erschwert und muß daher mit den nötigen Einschränkungen betrachtet werden. So kann Abschnitt 5.4.1 im wesentlichen als Beispiel dafür angesehen werden, wie sich eine Prognose der Entwicklung auf der Grundlage der hier dargestellten Methoden im einzelnen durchführen und gegebenenfalls auch auf die Entwicklung in der Bundesrepublik anwenden läßt, sobald auch für eine längerfristige Prognose in diesem Bereich hinreichende Daten vorliegen. Vorerst muß die in Abschnitt 5.4.2 gegebene Prognose zwangsläufig noch sehr unsicher sein und dürfte lediglich kurzfristig (etwa bis 1972) einigermaßen zutreffende Werte liefern.

Darüber hinaus müssen noch die Auswirkungen von Änderungen weiterer Annahmen in dem hier zugrunde gelegten Prognosemodell betrachtet werden. Führt man insbesondere statt der Annahme einer zeitlich konstanten Sättigungsgrenze eine zeitlich veränderliche ein, so wird das Modell erheblich komplexer und damit auch rechnerisch viel schwieriger zu handhaben; im allgemeinen ist dann die Differentialgleichung (5.12) nicht mehr geschlossen lösbar. Wegen des sehr viel höheren Aufwandes an numerischer Auswertung wurde dieser Weg rechnerisch nicht weiter verfolgt.

Näherungsweise kann man den Effekt einer variablen Sättigungsgrenze dadurch berücksichtigen, daß man statt der absoluten Verbreitung die Dichte $p(t)$ mit angenommener konstanter Sättigungsgrenze prognostiziert und dann daraus für einzelne Zeitpunkte die absolute Verbreitung mit variabler Sättigungsgrenze $m(t)$ berechnet. Für genauere Werte muß man auf die ursprüngliche Differenzengleichung (5.10) zurückgreifen, wobei die zeitlich veränderliche Sättigungsgrenze $m(t)$ einzusetzen ist. Für weiter in der Zukunft liegende Zeitpunkte erfordert das aber einen relativ hohen rechnerischen Aufwand, da der Verlauf nur von einem Anfangswert n_0 fortlaufend mit der Schrittweite Δt berechnet werden kann.

Ferner hat das hier zugrunde liegende Modell nur so lange Gültigkeit, als der Parameter c und die ihn bestimmenden Größen zeitlich konstant sind. Das ist aber offensichtlich in Zeiten normaler wirtschaftlicher Verhältnisse der Fall, wobei unter „normal“ durchaus auch größere konjunkturelle Schwankungen und Änderungen des Zinsniveaus einbezogen sein können. Wie die Daten des bisher bekannten Verlaufs ausweisen, hat selbst die Rezession 1966/67 kaum Einfluß auf den dem Modell zugrunde liegenden Entscheidungsprozeß und damit auf den Verlauf der Verbreitung gehabt. Solange nicht sehr viel detailliertere Zahlen über diese dem Parameter c be-

stimmenden Größen vorliegen, kann für den Fall der NC-Maschinen weiter nichts hierüber ausgesagt werden und das Modell muß daher in dieser Form vorläufig als zutreffend erachtet werden.

Schließlich ist bei den mit diesem Modell erarbeiteten Prognosen zu beachten, daß es sich dabei um die Verbreitung der NC-Maschinen bis zur Automatisierungsstufe 8 handelt, die sich nach dem in Abschnitt 4.3 Gesagten zu einer Klasse zusammenfassen und für prognostische Zwecke gemeinsam betrachten lassen. Die zweifellos für die nähere Zukunft bevorstehende Einführung noch höher automatisierter Fertigungssysteme kennzeichnet nach dieser Betrachtungsweise den Beginn einer weiteren Entwicklung, die sich der hier prognostizierten Verbreitung der NC-Maschinen bis zur Stufe 8 überlagert. Demnach treten später zu den hier prognostizierten Verbreitungszahlen für NC-Maschinen noch weitere erheblich höher automatisierte Fertigungssysteme hinzu. Dies ist für die im nächsten Abschnitt dargestellten Konsequenzen der Entwicklung ein wichtiger zu beachtender Umstand.

6. Arbeitsplatz-Strukturveränderungen aufgrund des Vordringens höher automatisierter Fertigungssysteme

Im 1. Untersuchungsabschnitt konnten mit Hilfe der systemtechnischen Betrachtungsweise als methodischem Werkzeug in mehreren Betriebsuntersuchungen die gegenwärtig zur Erzeugung von Teilespektren bei kleineren Losgrößen üblichen Fertigungsmittel hinsichtlich ihres Automatisierungsgrades und der ihnen entsprechenden Arbeitsplatzstrukturen analysiert werden. Dabei stellte sich heraus, daß eine für Prognosezwecke hinreichend eindeutige Zuordnung von bestimmten Arbeitsplatzstrukturen zu einzelnen Fertigungssystemen unterschiedlichen Automatisierungsgrades möglich ist. Zur näheren Beschreibung der Arbeitsplatzstrukturen konnten Zahlenangaben insbesondere für Qualifikationen bzw. auch Qualifikationsanforderungen an einzelnen Arbeitsplätzen sowie deren zeitliche Belastung durch ein Fertigungssystem gesammelt werden.

Im 2. Untersuchungsabschnitt wurden dann die wesentlichen Gründe — insbesondere auch die Wirtschaftlichkeit von Fertigungssystemen — untersucht, aus denen sich die beobachteten Veränderungen in der Fertigungsmittelstruktur erklären lassen und aufgrund deren die mutmaßliche weitere Entwicklung der Maschinenstruktur in Betrieben der Kleinserienfertigung prognostiziert werden konnte. Auf dieser Grundlage sollen im folgenden die wesentlichen Konsequenzen und Veränderungen für die zukünftigen Arbeitsplatzstrukturen erörtert werden, die sich daraus heute bereits anhand der Zuordnung zu den ver-

änderten Fertigungssystemen erkennen lassen. Dadurch können zwar die Veränderungen einzelner Tätigkeitsbereiche, deren Ausmaß und funktioneller Zusammenhang untereinander prognostiziert werden; auf welche Weise einzelne veränderte Tätigkeitsbereiche sich zu neuen Berufsbildern zusammenfassen lassen, kann daraus allerdings nicht gefolgert werden.

6.1 Allgemeine Folgerungen für die Arbeitsplatzstrukturen

Die Untersuchung zeitlicher Veränderungen der Fertigungsmittelstruktur im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung ließ deutlich erkennen, daß sich der Anteil von Fertigungssystemen der Automatisierungsstufen 1 und 2 erwartungsgemäß nur geringfügig geändert hat und auch kaum nennenswerten weiteren Änderungen unterliegen wird. Denn der Einsatz dieser Fertigungssysteme hängt weitgehend von dem Anteil von Teilen mit relativ großen Losgrößen am gesamten Teilespektrum eines Betriebes ab oder es handelt sich um Maschinen, die auf ganz besondere Fertigungsaufgaben spezialisiert sind (z. B. Räummaschinen, Abwälzfräsmaschinen).

Dagegen bilden gegenwärtig die NC-Fertigungssysteme der Stufen 4 bis 8 und später wahrscheinlich noch höher automatisierte Fertigungssysteme im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung die entscheidende technische Neuerung. Deren Entwicklung ist offensichtlich bereits bis in die Diffusionsphase fortgeschritten und ihre Verbreitung führt in den nächsten Jahren zu einschneidenden Veränderungen der Arbeitsplatzstrukturen ebenso wie an einzelnen Arbeitsplätzen.

Wesentliches Kennzeichen dieser Entwicklung der Automatisierung ist der Einsatz von NC-Maschinen in Verbindung mit deren immer enger werdenden Verknüpfung mit Datenverarbeitungsanlagen. Für die zugehörigen Arbeitsplatzstrukturen, d. h. die Beziehungen der einzelnen Arbeitsplätze untereinander, die durch die Informationsflüsse innerhalb der Fertigungssysteme verknüpft sind, ergibt sich damit als erste wesentliche Konsequenz eine Verlagerung der Verantwortung für den erfolgreichen Ablauf des Fertigungsprozesses an einzelnen Werkstücken von der inneren in die äußere Datenverarbeitung. Dadurch entstehen die neuen Tätigkeitsbereiche des Programmierens, Codierens und Werkzeu-gvoreinstellens, während Anreiß- und Inspektionsarbeiten zurückgehen und sich die Tätigkeit des Maschinenbedieners stark wandelt.

Mit der Einführung von Hilfsmitteln zur Erleichterung der Programmierung bis hin zum Einsatz von problemorientierten Programmiersprachen und Datenverarbeitungsanlagen zur maschinellen Programmierung ändert sich die Arbeits-

Platzstruktur vor allem der äußeren Datenverarbeitung weiter. Zwar treten dabei kaum neue oder wesentlich andere Anforderungen und Qualifikationen für den Programmierer auf, dagegen dürfte sich die Programmierzeit erheblich verkürzen, was besonders für den Bedarf an Programmierern wichtig ist (vgl. Abschnitt 6.3).

Bedingt durch den Einsatz von NC-Maschinen ergeben sich noch weitere Veränderungen und organisatorische Umstellungen, die jedoch teilweise auch den konventionellen Maschinen zugute kommen. Dazu gehört zunächst eine gegenüber früher sehr viel systematischere Organisation durch den Aufbau von Maschinen-, Werkstoff- und Werkzeugkarteien, in denen alle für die Fertigung erforderlichen Daten festgehalten sind. Für die Programmierung von NC-Maschinen ist das Vorhandensein zumindest einer Werkzeugkartei unabdingbar. Damit sind bereits wesentliche Voraussetzungen für eine Automatisierung der Arbeitsvorbereitung durch Datenverarbeitungsanlagen geschaffen. Durch diese Veränderungen — Programmierung von NC-Maschinen, Aufbau und Verwaltung von Karteien, Delegation von Routinearbeiten an Datenverarbeitungsanlagen — entstehen in der äußeren Datenverarbeitung veränderte Tätigkeitsbereiche.

Weitere allgemeine Umstellungen und Veränderungen der Arbeitsplatzstrukturen sind mit der Einführung des rechnergestützten Konstruierens und der automatisierten Fertigungssteuerung zu erwarten. Über die Auswirkungen des rechnergestützten Konstruierens läßt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur recht wenig sagen, da diese Neuerung sich noch mehr oder weniger in der Entwicklungsphase befindet und Anwendungsfälle während der Betriebsuntersuchungen noch nicht beobachtet werden konnten. Dagegen erscheinen die Konsequenzen der automatisierten Fertigungssteuerung für die Arbeitsplatzstrukturen recht klar. Dadurch entfällt im wesentlichen die Terminüberwachung, ein Teil der Terminplanung und auch ein wesentlicher Teil des bisherigen Tätigkeitsbereichs der Meister, nämlich die Verteilung von Aufträgen in ihrem jeweiligen Aufsichtsbereich, die dann in einer zentralen Datenverarbeitungsanlage automatisch abgewickelt werden.

An dieser Stelle werden auch die Auswirkungen auf die soziale Struktur im Betrieb besonders deutlich, die sich mit veränderten Tätigkeitsbereichen bestehender und dem Entstehen neuer Arbeitsplätze ergeben. Zwar läßt sich über die bereits recht klar sichtbaren Arbeitsplatzstrukturveränderungen durch die Einführung von NC-Fertigungssystemen bis zur Stufe 8 hinaus gegenwärtig nur in groben Zügen ein Bild der mutmaßlichen Veränderungen vor allem in der äußeren Datenverarbeitung machen. Die Ent-

wicklung der technischen Mittel zur Automatisierung der Routinetätigkeiten in diesem Bereich dürfte noch lange nicht abgeschlossen sein, so daß eine ins einzelne gehende Analyse der möglicherweise von dieser Entwicklung betroffenen Tätigkeitsbereiche im Rahmen dieser Untersuchungen noch nicht möglich war. Jedoch kann heute schon als sichere allgemeine Konsequenz der mit der technischen Neuerung der NC-Maschine begonnenen Entwicklung der Automatisierung in der Kleinserienfertigung angenommen werden, daß allgemeine Ausbildungsfragen, sowohl in der Grundausbildung als auch in der Umschulung und Fortbildung das Hauptproblem bei der Einführung und beim verbreiteten Einsatz höher automatisierter Fertigungssysteme darstellen. Aufzeigen läßt sich dieses Problem bereits an der Verbreitung der heute üblichen NC-Fertigungssysteme. Die Programmierer gingen nahezu ausschließlich aus den Reihen der eigenen Facharbeiter hervor und wurden in Kursen in der eigenen Firma oder bei Dritten, wie z. B. Werkzeugmaschinenherstellern, Steuerungsherstellern, Exapt-Verein, usw., umgeschult (vgl. auch [36]). Durch die wachsende Verbreitung der NC-Maschinen und die große Zahl neu entwickelter Programmiersprachen ist ein ständiger Bedarf an Schulungskursen vorhanden, der sich dadurch noch erhöht, daß meist in der Grundausbildung viel zu wenig systematische sprachliche und naturwissenschaftliche Grundkenntnisse vermittelt werden und damit die Fortbildungsfähigkeit erschwert ist. Ganz ähnliche Schwierigkeiten treten auch bei der Umschulung der Maschinenbediener von konventionellen zu NC-Maschinen auf, ebenso wie — wenn auch wegen der kleineren Zahl der Betroffenen — bei der Ausbildung für die Werkzeugvoreinstellung und die Wartung der Steuerungen.

Solange die Ausbildungsprobleme nicht sehr viel besser als bisher gelöst sind, können sie vor allem in Anbetracht der weiteren Entwicklung zu kaum noch vertretbaren wirtschaftlichen und vor allem sozialen Reibungsverlusten führen, die ihren Niederschlag unter anderem in Unzufriedenheit, Unsicherheit und sozialen Spannungen inner- und außerhalb der Betriebe finden. Daß Anpassungsschwierigkeiten jedoch vor allem durch rechtzeitige Planung und Aufklärung verringert werden können, konnte in einem Betrieb der Untersuchung besonders gut beobachtet werden, wo solche Umstellungen beispielsweise mit Hilfe von Anforderungsprofilen neuer Arbeitsplätze und Qualifikationsprofilen der Mitarbeiter bewältigt wurden, deren Vergleich für die Umschulung geeignete Kandidaten und den mutmaßlichen Lernaufwand erkennbar werden ließen.

In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach einer möglichen durch die Verbreitung der NC-Maschinen bedingten Freisetzung

oder einem Abstieg in der sozialen Stellung im Betrieb vor allem der älteren oder gering qualifizierten Mitarbeiter. Zur Zeit der Untersuchung konnten Konsequenzen dieser Art noch nicht festgestellt werden, da der Anteil der NC-Maschinen am gesamten Maschinenpark noch zu gering war. Wie am Beispiel zweier Betriebe verfolgt werden konnte, hängt der Personalbestand in der mechanischen Bearbeitung ganz offensichtlich von der allgemeinen Konjunkturlage sowie der Auftragslage des Betriebes ab, während im Vergleich dazu der entsprechende Maschinenpark davon unberührt bleibt und stattdessen der längerfristigen Investitionspolitik folgt. So sind Entlassungen gegenwärtig noch in sehr viel stärkerem Maße konjunkturbedingt, als daß sie durch das Vordringen der NC-Maschinen hervorgerufen wurden. Auf lange Sicht jedoch dürften Auswirkungen dieser Art wegen der sehr viel höheren Produktivität der NC-Maschinen, der Verringerung des Aufwands an Anreiß- und Kontrollarbeiten und der weiteren Automatisierung der äußeren Datenverarbeitung fühlbar werden, sobald die Verbreitung der NC-Fertigungssysteme im Vergleich zum übrigen Maschinenpark stärker ins Gewicht fällt. Das Ausmaß dieser Auswirkungen muß gegenwärtig jedoch noch offen bleiben.

6.2 Charakteristische Veränderung der Struktur und Qualifikation von Arbeitsplätzen

Im folgenden soll auf die Veränderung der Arbeitsplatzstrukturen beim Übergang zu höher automatisierten Fertigungssystemen nur noch soweit eingegangen werden, als dies nicht bereits an anderer Stelle ausführlich geschehen ist (vgl. [2] u. [3], Beitrag 4), sondern es sollen einige für die Entwicklung besonders typische Veränderungen bei den einzelnen Arbeitsplätzen oder Tätigkeitsbereichen behandelt werden. Dabei werden neben der Tätigkeitsveränderung die Qualifikationsanforderungen und die Bewertung der Tätigkeit im Vordergrund stehen.

Unmittelbar am stärksten betroffen durch die in Abschnitt 5 prognostizierte Verbreitung höher automatisierter Werkzeugmaschinen ist der Arbeitsplatz des Maschinenbedieners. In [2] (Tafel 2) sind die hauptsächlichen Tätigkeiten des Maschinenbedieners für die einzelnen Automatisierungsstufen zusammengestellt worden. Die prinzipiellen Unterschiede ergaben sich dabei aus der Art der Eingabe der Arbeitsinformationen.

Während bei den handbedienten Werkzeugmaschinen die geometrischen und technologischen Informationen aus Zeichnungen und Arbeitsplänen direkt vom Maschinenbediener eingegeben werden, wobei dieser aus eigener Erfahrung oft noch Modifikationen vornimmt, erfolgt die Dateneingabe in den automatisierten Stufen selbstständig. Dabei wird der Maschinenbediener von der

Verantwortung für die richtige Entnahme von Daten aus Zeichnungen oder Arbeitsplänen und ihre fehlerfreie Eingabe in die Maschine entbunden. Nicht minder wichtig ist der Fortfall des Messens, das eine erhebliche Aufmerksamkeit verlangt.

Die Verantwortung für die fehlerfreie Fertigung des Werkstückes geht also zum größten Teil auf die Arbeitsvorbereitung über. Wegen des im allgemeinen erheblich größeren Kapitaleinsatzes steigt jedoch die Verantwortung des Maschinenbedieners für die Einsatzbereitschaft der kapitalintensiven Maschine. Die für den NC-Maschinenbediener geforderte Qualifikation hängt wesentlich davon ab, ob er die Einrichtung der Maschine selbst vornimmt und welche Eingriffsmöglichkeiten in den Arbeitsablauf noch möglich bzw. erforderlich sind.

Es sind aus diesem Grunde ebenso wie im Fall der handbedienten Maschine bei der Lohngruppenermittlung für automatisierte Maschinen starke Schwankungen festgestellt worden (vgl. [2], Tafel 7). Ist die Tätigkeit nur noch auf das Ein- und Ausspannen der Werkstücke und das Einlegen des Lochstreifens sowie die Nullpunkt Korrektur beschränkt, so ist damit gegenüber der entsprechenden handbedienten Maschine eine geringere Qualifikation erforderlich.

Es wurde zum Teil die Erfahrung gemacht, daß qualifizierte Arbeitskräfte auch bei gleicher Bezahlung eben wegen der zurückgegangenen aktiven Tätigkeiten sich teilweise an einem solchen Arbeitsplatz nicht ausgelastet fühlen und daher für längere Zeit nicht zu halten sind.

Für die Bedienung von einfachen NC-Maschinen wurden vielfach auch neu angelehrte Arbeitskräfte eingesetzt. Auch in diesen Fällen lag aber die Mindestlohngruppe bei 5, während bei den konventionellen Maschinen Lohngruppe 3 die niedrigste war. Wie auch aus dem Anstieg der häufigsten Lohngruppe sichtbar wird, sind beim Übergang zu NC-Maschinen keine Einstufungen in niedrigere Lohngruppen erfolgt. Auch wenn dies aufgrund der geringen fachlichen Anforderungen möglich gewesen wäre, so steht dem nicht nur die oben genannte höhere Verantwortung für die Einsatzbereitschaft der teuren NC-Maschine entgegen, sondern es ist zu berücksichtigen, daß der NC-Maschinenbediener nicht in dem Maße wie ein Akkordarbeiter die Höhe seiner Entlohnung bestimmen kann, da die fest programmierte Hauptzeit nicht zu beeinflussen ist. Da dieser Nachteil aber nicht zu Lasten des Maschinenbedieners gehen sollte, wurde er teilweise durch eine höhere Lohngruppe ausgeglichen. In den überwiegenden Fällen ist jedoch die Höherbewertung durch die zusätzliche Ausbildung zur Bedienung der NC-Maschine gerechtfertigt.

Der NC-Maschinenbediener sollte in der Lage sein, mit dem Programmierer Probleme der Programmierung seiner Maschine besprechen zu können. Durch die stärkere Informationsverknüpfung mit anderen Betriebsteilen wird vom Bediener einer NC-Maschine verlangt, daß er die Einordnung seiner Maschine innerhalb der Betriebsorganisation nicht nur kennt, sondern durch vorausschauende Planung auch dazu beiträgt, daß die Maschinenauslastung möglichst hoch ist.

Für die Bewertung und die Entlohnung der NC-Maschinenbediener ergeben sich daher Probleme in der Berücksichtigung der speziell für die NC-Maschine geforderten dispositiven Fähigkeiten und in der Beteiligung der Arbeitnehmer am Betriebserfolg bei einer guten Auslastung der Maschine. Wie die Betriebsuntersuchungen zeigten, sind beide Probleme noch keineswegs zufriedenstellend gelöst. Wegen ihrer Bedeutung für den Maschinenbediener soll deshalb darauf näher eingegangen werden.

Beispielsweise wird in einem der besuchten Betriebe die Arbeitsplatzbewertung durch Anforderungsprofile vorgenommen. Es werden dabei Anforderungen berücksichtigt, mit denen Hand-, Maschinen- und Büroarbeiten erfaßt werden können, um auf diese Weise zu einer einheitlichen Bewertung aller Tätigkeiten zu gelangen. Insgesamt sind 14 Merkmale aufgestellt worden, u. a. Schulbildung, Berufserfahrung, geistige Anforderungen, Belastung von Sinnen und Nerven, Muskelbelastung usw. Die Bewertung innerhalb der einzelnen Anforderungsarten erfolgt in Zahlen von 0 bis 100. Für die Zuordnung des bewerteten Arbeitsplatzes zu einer Lohngruppe werden die Anforderungsarten unterschiedlich gewichtet.

Die Bedeutung von Anforderungsprofilen liegt aber nicht nur in der Arbeitsbewertung für die Entlohnung. Ebenso wie für Anforderungen lassen sich so auch Qualifikationsprofile für die Fähigkeiten der Mitarbeiter aufstellen. Durch einen Vergleich beider Profile ist dann eine optimale Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen möglich.

Beim Vergleich der Anforderungsprofile beispielsweise eines angelernten Fräasers und eines NC-Bediener lagen die Anforderungen lediglich bei der manuellen Geschicklichkeit für den Fräser höher. Auffallend war, daß nur bei der Schulbildung an den NC-Bediener mit 35 gegenüber 20 eine erheblich höhere Anforderung gestellt wurde; in allen anderen Fällen war sie gar nicht oder nur geringfügig höher, so daß insgesamt die Arbeitswertgruppe nur um eine Stufe höher lag. Richten die Maschinenbediener ihre Maschine selbst ein, so lag die Bewertung im allgemeinen um eine Lohngruppe höher.

In den besuchten Betrieben waren nur in geringem Maße Einrichter beschäftigt. Wie aus [2] (Tafel 7) zu ersehen ist und auch das Beispiel im oben genannten Bewertungsbogen bestätigt, werden die Tätigkeiten der Einrichter hoch bewertet. Dies ist gegenüber Maschinenbedienern, die selber ihre Maschine einrichten, durch die größere manuelle Geschicklichkeit, Selbständigkeit, Vielseitigkeit und übrigen geistigen Anforderungen bedingt, die notwendig sind, wenn mehrere verschiedene Maschinen einzurichten sind. Außerdem wird Umgangsgeschick und Fachaufsicht verlangt. Die Stellung des Einrichters im Betrieb ist meist mit der eines Vorarbeiters zu vergleichen.

Größere Schwierigkeiten als die Bewertung bringt für die Betriebe meist die leistungsgerechte Entlohnung der NC-Maschinenbediener mit sich. Es wurde allgemein die Ansicht vertreten, daß wegen der geringen beeinflussbaren Zeiten eine Akkordentlohnung für NC-Maschinen nicht geeignet ist und der tariflich vorgesehene Zeitlohn zu einer deutlichen Einkommenseinbuße führt. Daher wird der Zeitlohn oft durch eine höhere Lohngruppe, Sonderzulagen und/oder Prämien angehoben.

Für ein geeignetes Lohnsystem sollte gelten, daß es den Arbeitnehmer an den Produktivitätssteigerungen beteiligt. Es wurde bereits auf die Bedeutung der Auslastung der NC-Maschinen für ihre Wirtschaftlichkeit hingewiesen. Da hierzu der Maschinenbediener beitragen kann, so sollte auf dieser Grundlage auch seine Leistungsentlohnung erfolgen. Wenn sich die Prämie nach dem Auslastungsgrad der Maschine richtet, so ist es schwierig, die nicht vom Bediener zu verantwortenden Stillstandszeiten zu eliminieren. Es ist außerdem zu berücksichtigen, daß der Anteil der beeinflussbaren Zeiten von Auftrag zu Auftrag stark schwanken kann. Um den NC-Maschinenbedienern trotz der starken Schwankungen der beeinflussbaren Zeiten je Auftrag immer eine gleiche Verdienstchance zu geben, wurde vorgeschlagen, den zu prämierenden Bereich vom

$$\alpha = \frac{\text{beeinflussbarer Zeitanteil pro Auftrag}}{\text{Auftragsausführungszeit}}$$

abhängig zu machen [37]. Dadurch kann berücksichtigt werden, daß es einer größeren Leistung bedarf, um bei einem kleineren Anteil der beeinflussbaren Zeiten den Zeitgrad auf einen bestimmten Wert zu steigern, als wenn der beeinflussbare Zeitanteil größer wäre. Bei der Entlohnung von NC-Maschinenbedienern sollte außerdem berücksichtigt werden, welche Arbeiten er während der Hauptzeit noch verrichtet. Teilweise werden in der Hauptzeit die Werkzeuge voreingestellt, Nachbearbeitungen durchgeführt und dgl. mehr. Ob der neue Tätigkeitsbe-

reich „Werkzeugvoreinstellung“ günstiger zentral in der äußeren Datenverarbeitung für mehrere Maschinen oder dezentral an den NC-Maschinen selbst als Nebenarbeit für den Maschinenbediener während der Programmlaufzeit einzurichten ist, muß vorläufig noch offen bleiben; für beide Organisationsformen konnten während der Betriebsuntersuchungen Beispiele beobachtet werden. Festzustellen ist jedoch ein Trend zu einer zentralen Werkzeugvoreinstellung, allein schon wegen der empfindlichen und teuren Einstellgeräte, die sich so besser pflegen und auslasten lassen.

Es war ursprünglich angenommen worden, daß auch eine verstärkte Wartung der automatisierten Maschinen zusätzliche Arbeitsplätze notwendig werden lassen. Wie auch aus [2] (Tafel 8) hervorgeht, ist dies zur Zeit nur bedingt der Fall.

Die Ausfallzeiten von Steuerungen sind nach einer gewissen Übergangszeit so gering, daß es beim Einsatz weniger NC-Maschinen ausreicht, wenn bei Störungen Wartungskräfte des Steuerungsherstellers erreichbar sind. Die Ausfallzeiten von NC-Maschinen sind zum größten Teil organisatorisch bedingt [18].

Auf die in der äußeren Datenverarbeitung neu hinzukommenden Arbeitsplätze des Codierers und des Operators soll hier nicht näher eingegangen werden. Bei der Codierung wird — entweder von einer Schreibrkraft oder vom Programmierer selbst — das fertig geschriebene Programm lediglich in den Steuerlochstreifen umgesetzt. Durch in letzter Zeit verbesserte Prüfverfahren wird die Fehlermöglichkeit beim Übertragen des Programms in den Lochstreifen stark verringert [21]. Die Tätigkeit des Operators an der Datenverarbeitungsanlage wird durch den Einsatz von NC-Maschinen nicht beeinflusst. Denn der Operator ist ganz allgemein für die organisatorische Abwicklung aller Aufgaben, die dem Rechner übertragen werden, verantwortlich.

Die hauptsächlichlichen Veränderungen in der Arbeitsvorbereitung werden durch die Teileprogrammierung hervorgerufen. Grundsätzlich muß dabei zwischen der manuellen und der maschinellen Programmierung unterschieden werden. Das manuelle Programmieren ist besonders bei komplizierten Werkstücken zeitraubend und sehr fehleranfällig; denn es müssen maschinen-, Werkzeug- und werkstoffabhängige Werte aus Tabellen entnommen werden, und es sind u. U. sehr viele Berechnungen für Positionsangaben anzustellen. Voraussetzung für einen Programmierer von Werkzeugmaschinen ist, daß er das von ihm zu programmierende Fertigungsverfahren beherrscht, da er in der Lage sein muß, den Arbeitsprozeß gedanklich vorweg zu vollziehen. Neben der Werkstatterfahrung sollte er Grundkenntnisse in der Trigonometrie besitzen. Genauigkeit, Zuverlässigkeit und die Fähigkeit zur

Handhabung einer größeren Menge von Unterlagen sind zusätzliche Eigenschaften, die ein Programmierer haben sollte und die ihn als hoch qualifizierte Fachkraft kennzeichnen. Die zur Programmierung notwendigen Berechnungen lassen sich auch von Kleinrechnern, die für geometrische und technologische Routineberechnungen für bestimmte Fertigungsverfahren oder Maschinen programmierbar sind, durchführen. Beim Übergang zur maschinellen Programmierung mit problemorientierten Programmiersprachen fällt je nach deren Leistungsfähigkeit ein größerer oder kleinerer Teil der zeitraubenden Routineberechnungen weg [38]. Bei der Qualifikation für die Tätigkeit eines Teileprogrammierers müssen die unterschiedlichen Schwierigkeiten je nach Programmierverfahren und Vielgestaltigkeit der Werkstücke berücksichtigt werden.

Das Anforderungsprofil entsprechend den oben genannten Bewertungsbogen zeigte, daß Schulbildung, Berufserfahrung, Selbständigkeit, Vielseitigkeit, geistige Anforderungen, Umgangsgeschick und Verantwortung für die eigene Arbeit mit etwa 70 von 100 möglichen Punkten sehr hoch bewertet wurden. Der hohe Ausbildungsstand der Programmierer wird durch eine amerikanische Umfrage bestätigt [36]: 43% der Programmierer hatten eine Techniker- oder Ingenieurausbildung, 83 % mindestens Mittelschulabschluß.

Die Umfragen in einigen deutschen Betrieben ergaben, daß für die Programmierung meist gute Mitarbeiter aus der Arbeitsvorbereitung oder geeignete Facharbeiter herangebildet worden sind.

6.3 Folgerungen für den personellen Bedarf

Für eine Vorausschau auf den absoluten Bedarf — zumindest für den Bereich der Bundesrepublik — besteht die bereits weiter oben diskutierte Schwierigkeit, daß für die fernere Zukunft bereits die Verbreitung von NC-Maschinen zunehmend unsicherer wird. So erscheint es zweckmäßig, zunächst den auf eine NC-Maschine bezogenen Bedarf an Arbeitskräften zu erörtern, aus dem sich dann der absolute Bedarf jederzeit über die Zahl der eingesetzten NC-Maschinen abschätzen läßt.

Zunächst kann davon ausgegangen werden, daß pro NC-Maschine ein Bediener erforderlich ist, der zwar in der Regel noch bis zu etwa 20 oder 30 % der Zeit eine Reihe von Nebenarbeiten durchführen kann. Nach den bisherigen Erfahrungen erscheint aber eine Mehrmaschinenbedienung auch für die Zukunft kaum in nennenswertem Umfang möglich oder sinnvoll, da ein Zusammentreffen dazu durch entsprechende Programmlaufzeiten geeigneter Teile einen organisatorischen Aufwand bedingen würde, der durch die möglichen Einsparungen an Lohnko-

sten kaum zu rechtfertigen ist, während auch nur kurze Maschinenstillstandszeiten erheblich ins Gewicht fallen.

Der Programmieraufwand pro NC-Maschine hängt neben den durch verschiedene Automatisierungsgrade (2achsige punkt- und streckengesteuerte Maschinen der Stufe 4 bis zu mehrachsigen bahngesteuerten Bearbeitungszentren mit automatischem Werkzeugwechsel der Stufe 8) bedingten Unterschieden auch noch vom Teilespektrum, insbesondere der Wiederholhäufigkeit der Teile ab. Besonders bei Einführung neuer NC-Maschinen ist daher der Aufwand für die Programmierung hoch, bis ein größerer Teil des über diese Maschinen laufenden Teilespektrums bereits programmiert ist. Gegenwärtig erfordert eine NC-Maschine im Mittel ungefähr 0,6 (Stufe 4) bis 1 (Stufe 8) Programmierer, wobei diese Zahlen noch geringfügig nach unten oder oben variieren können, je nachdem welche Programmierhilfen im einzelnen zur Verfügung stehen und wie viele Programme bereits vom Maschinenhersteller als Software geliefert wurden. Diese Erfahrungswerte decken sich recht gut mit entsprechenden Angaben und Erfahrungen amerikanischer NC-Anwender [36]. Zu erwarten ist, daß sich diese Verhältniszahlen noch erheblich verringern, sobald der Zuwachs an NC-Maschinen wieder zurückgeht und vor allem noch leistungsfähigere Programmierhilfen, allen voran die maschinelle Programmierung mit komfortablen problemorientierten Sprachen wie *Exapt 2* und *3*, sowie adaptiv geregelte NC-Maschinen eingeführt sind. Welchen Aufwand dagegen die für die Zukunft zu erwartenden noch höher automatisierten Fertigungssysteme mit on-line-Verknüpfung von Werkzeugmaschinen und Datenverarbeitungsanlagen erfordern, ist heute noch nicht abzusehen.

Eine Schätzung ebensolcher Verhältniszahlen für die übrigen neuen Tätigkeitsbereiche „Codierung“ und „Werkzeuvoreinstellung“ erweist sich als schwierig, da darüber zu wenig oder keine Zahlen bekannt sind. Nach den zum 1. Untersuchungsabschnitt durchgeführten Betriebsuntersuchungen, die jedoch notgedrungen nicht als repräsentativ gelten können, werden im Mittel

ungefähr 0,1 bis 0,2 Werkzeuvoreinsteller pro NC-Maschine benötigt, wenn der Maschinenbediener diese nicht selbst voreinstellt und je nachdem, wie werkzeugaufwendig das jeweils zu fertigende Teilespektrum ist. In noch geringerem Maße sind für NC-Maschinen zusätzlich Einrichter erforderlich, da die Bediener ihre Maschinen überwiegend selbst umrüsten. Für die Codierung liegen ebensowenig Daten vor wie für das zusätzlich benötigte Wartungspersonal oder den Rückgang an Anreiß- und Kontrollplätzen, für die daher ähnliche Verhältniszahlen wie oben gegenwärtig noch offen bleiben müssen.

Mit diesen Verhältniszahlen dürfte sich auf der Grundlage der in Abschnitt 5 erarbeiteten Prognose der Verbreitung von NC-Maschinen der mutmaßliche absolute Bedarf an entsprechend qualifizierten Arbeitskräften näherungsweise bestimmen lassen. Dabei ist noch in Rechnung zu stellen, daß sich innerhalb der für die Prognose zusammengefaßten Klasse von NC-Maschinen der Stufen 4 bis 8 das Verhältnis von hohen zu weniger hoch automatisierten Systemen höchstwahrscheinlich zugunsten der höheren Stufen (mehrachsige numerisch gesteuerte Maschinen mit automatischem Werkzeugwechsel) verschieben wird.

Zusammen mit den Ergebnissen des 1. Untersuchungsabschnitts dürfte damit die Prognosefähigkeit dieses systemtheoretischen Ansatzes für die durch die Automatisierung bedingten Arbeitsplatzstrukturveränderungen im Bereich der Kleinserienfertigung weitgehend nachgewiesen sein. Zwar sind gegenwärtig Einzelheiten vor allem über das quantitative Ausmaß noch unsicher; diese Unsicherheiten dürften aber auf der dargestellten theoretischen Grundlage korrigierbar sein. Auf andere Bereiche der industriellen Produktion läßt sich dieses theoretische Konzept nicht ohne weiteres direkt übertragen, da die Produktionssysteme in den verschiedenen Bereichen anders strukturiert sind. Allerdings erscheint auch dort eine analoge Vorgehensweise möglich, die über eine systemtechnische Strukturanalyse der für den jeweiligen Bereich typischen Produktionssysteme zu prognostischen Ansätzen gelangt.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Brödner, P. und Grundlagen-Untersuchung über die Prognosefähigkeit systemtheoretischer Strukturmodelle im Hinblick auf Arbeitsplatz-Strukturveränderungen, Jahresbericht über den 1. Untersuchungsabschnitt, Dezember 1968.
- [2] Brödner, P. und Automatisierung und Arbeitsplatzstrukturen. Bericht über Methoden und Ergebnisse von Untersuchungen in der Einzel- und Kleinserienfertigung. „Mitteilungen“ des IAB, Nr. 8, 1969.
- [3] Simon, W. (Hrsg.): Produktivitätsverbesserungen mit NC-Maschinen und Computern, München 1969.
- [4] Sellien, R. (Hrsg.): Dr. Gablers Wirtschaftslexikon, 7. Aufl. Wiesbaden 1967.
- [5] Wöhe, G.: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Berlin/Frankfurt 1967.
- [6] Jacob, H.: Investitionsplanung mit Hilfe der Optimierungsrechnung. In: „Optimale Investitionspolitik“, Hrsg. H. Jacob, Schriften zur Unternehmensführung“, Bd. 4, Wiesbaden 1968.

- [7] *Schneider, E.:* Wirtschaftlichkeitsrechnung, Theorie der Investition, Tübingen/Zürich 1957.
- [8] *Blohm, H. und Lüder, K.:* Investition, Schwachstellen im Investitionsbereich des Industriebetriebs und Wege zu ihrer Beseitigung, Berlin/Frankfurt 1967.
- [9] VDI-Richtlinien 3258: Kostenrechnung mit Maschinenstundensätzen Blatt 1, Okt. 62 und Blatt 2, März 1964.
- [10] *Rosenkranz, W.* Erfahrungen beim Einsatz numerisch gesteueter Maschinen in der Elektroindustrie bei spanloser und spanender Fertigung, Werkstatt und Betrieb, 101 (1968), Nr. 10.
- [11] *Schuler, H.:* Die Wirtschaftlichkeit numerisch gesteuerter Drehmaschinen, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 61 (1967), Nr. 9.
- [12] *Wöpfkemeier, H. F. und Möbius, H. G.:* Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit numerisch gesteuerter Revolverdrehmaschinen, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 61 (1967), Nr. 9.
- [13] *Petermann, W.* Zur Wirtschaftlichkeit der Fertigung auf u. Sadowy, M.: Bearbeitungszentren, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 63 (1969), Nr. 9.
- [14] *Schöbel, M.:* Die Wirtschaftlichkeit der numerischen Steuerungen bei Drehmaschinen, Maschinenwelt, 22. Jahrg., Heft 7.
- [15] *Köhler, E.:* Die Wirtschaftlichkeit von Numerik-Drehmaschinen, Werkstatt und Betrieb, 101 (1968), Nr. 4.
- [16] *Fleck, H. G. u. Heinbach, O.:* Beispiele über den wirtschaftlichen Einsatz numerisch gesteuerter Koordinatenbohrmaschinen, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 61 (1967), Nr. 9.
- [17] *Müller, B. und Roller, H.:* Erfahrungen mit numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, Siemens-Zeitschrift, 43 (1969), Nr. 6.
- [18] *Falk, S.:* Werkzeugmaschinen mit numerischen Steuerungen in einem Fertigungsbereich mehr als 240000 Fertigungsstunden im Einsatz, Werkstatt und Betrieb, 101 (1968), Nr. 10.
- [19] *Stehle, P.:* Eine Methode zur Wirtschaftlichkeitsrechnung unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, Diss. TH Aachen, 1966.
- [20] *Herrmann, J. u. Schrenk, G.:* Erfahrungen mit EXAPT 1 bei Großteilbearbeitung, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 62(1968), Nr. 11.
- [21] *Hamke, F.:* Probleme der Arbeitsvorbereitung beim Einsatz von NC-Maschinen, VDI-Bildungswerk BW 1170.
- [22] *Williamson, D. T. N.:* Ein neues Fertigungsverfahren, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 61 (1967), Nr. 9.
- [23] *Sundstrand Corp.:* Direkte Steuerung von Werkzeugmaschinen durch Rechner, TZ für prakt. Metallbearbeitung, 62 (1968), Nr. 7.
- [24] *Jantsch, E.:* Technological Forecasting in Perspektive, OECD, Paris, 1967.
- [25] *Gerfin, H.:* Langfristige Wirtschaftsprognose, Tübingen/Zürich 1962.
- [26] BBC: Informationen für den Konstrukteur: Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, Heft 4 und 5, 1968.
- [27] *Infratest-CMP:* Der Einsatz numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen in der Bundesrepublik Deutschland einschl. West-Berlin, Rationalisierung, 19 (1968), Heft 3.
- [28] *VDMA:* Statistisches Handbuch für den Maschinenbau, Frankfurt 1968.
- [29] *Daeves, K.:* Vorausbestimmungen im Wirtschaftsleben, Essen 1951.
- [30] *Griliches, Z.:* Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change, *Econometrica*, 25 (1957), No. 4.
- [31] *Lancoud, Ch. u. Trachsel, R.:* Neue Studie über die wahrscheinliche Entwicklung des Telefons in der Schweiz, Technische Mitteilungen PTT, Bern, 1963, Nr. 12.
- [32] *Mansfield, E.:* Technical Change and the Rate of Imitation, *Econometrica*, 29 (1961), No. 4.
- [33] *Lahner, M. u. Ulrich, E.:* Analyse von Entwicklungsphasen technischer Neuerungen, „Mitteilungen“ des IAB, Nr. 6, 1969.
- [34] o. V. The Diffusion of New Technology, A Study of Ten Processes in Nine Industries, *National Institute Economic Review*, No. 48, 1969.
- [35] *Stooß, F.:* Die Veränderungen der beruflichen Gliederung der Erwerbspersonen nach Wirtschaftszweigen in der Bundesrepublik 1950—1961. „Mitteilungen“ des IAB, Nr. 4, 1968.
- [36] *Smith, D. N. u. McCaroll, J. D.:* Gegenwärtige Trends bei der numerischen Steuerung, *Technica*, 1969, Nr. 12.
- [37] *Fuchs, W. und Osswald, B.:* Prämienentlohnung bei Arbeiten an numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen, Werkstatt und Betrieb, 101 (1968), Nr. 7.
- [38] *Langebartels, R.:* Programmieren von numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen mit den fertigungstechnisch orientierten Programmiersprachen: APT und EXAPT, VDI-Z, 111 (1969), Nr. 12.