

**Pilotanlage für die Drehbearbeitung
mit Adaptive Control und
automatischer Schnittaufteilung**

Dipl.-Ing. F. Breuer

**Laboratorium für Werkzeugmaschinen und
Betriebslehre der RWTH Aachen**

August 1980

1. Einleitung

Schritt 1: Beschreibung der Aufgaben, z. B. als Funktionsplan.

Für die Fertigungstechnik wurden adaptive Regelungssysteme (Adaptive Control Systeme) entwickelt, mit denen die Teilebearbeitung auf Werkzeugmaschinen hinsichtlich verschiedener Zielkriterien optimiert wird. Es handelt sich dabei zum einen um Grenzregelungen (Adaptive Control Constraint, ACC), die eine Ausnutzung der maximalen Maschinenleistung trotz wechselnder und unvorhersehbarer Bearbeitungsbedingungen bei gleichzeitigem Schutz von Maschine und Werkzeug gegen Überlastung zum Ziel haben. Zum anderen wurden Optimierungsregelungen (Adaptive Control Optimisation, ACO) aufgebaut, die anhand von rechnergeführten Kostenmodellen einen optimalen Prozeßablauf ermöglichen. Der Einsatzbereich der AC-Systeme erstreckt sich hauptsächlich auf numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, da dort die Voraussetzungen zur automatischen Beeinflussung des Bearbeitungsprozesses am ehesten vorhanden sind.

Im Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen wurde entscheidend an der Entwicklung von AC-Systemen für unterschiedliche Bearbeitungsverfahren mitgearbeitet. An Versuchsanlagen ließ sich deren Funktionsfähigkeit im Laborbetrieb nachweisen. Das Forschungsvorhaben "Pilotanlage für die Drehbearbeitung mit Adaptive Control und automatischer Schnittaufteilung" stellte die konsequente Fortsetzung dieser Entwicklungsarbeiten dar.

2. Stand der Technik

In der NC-Technik muß der Werkstückbearbeitungsablauf im voraus geplant und festgelegt werden. Zur Beherrschung unvorhersehbarer Prozeßzustände - wie z.B. schwankende Rohteilabmessungen oder abweichende Werkstoffeigenschaften - ist das NC-Programm aus Sicherheitsgründen auf den ungünstigsten Bearbeitungsablauf auszurichten. Das führt oft zu einer Nichtausnutzung der vorhandenen Maschinenleistung.

Ein optimaler Bearbeitungsprozeß kann nur erzielt werden, wenn die maßgeblichen Prozeßgrößen, wie z.B. Rohteilabmessungen, Spänefluß oder Schnittwerte, während der Bearbeitung, also "on-line", erfaßt und die Vorgabewerte durch eine Regelung zur Verbesserung des Prozeßablaufs korrigiert werden. Diese Aufgabenstellung lag der Ent-

wicklung von AC-Systemen zugrunde. Im Bild 1 sind der prinzipielle Aufbau und charakteristische Meß- und Stellgrößen eines AC-Systems am Beispiel der Drehbearbeitung dargestellt.

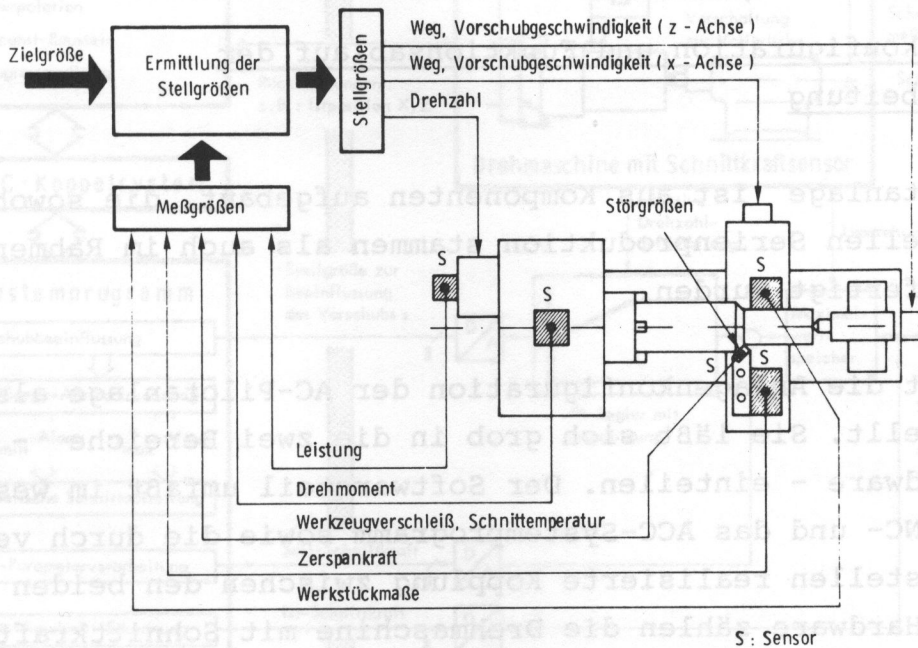


Bild 1: Aufbauprinzip eines AC-Systems mit charakteristischen Meß- und Stellgrößen

Der derzeitige Entwicklungsstand von AC-Systemen ist dadurch gekennzeichnet, daß einfache Systeme, wie z.B. Grenzregelungen für die Fräsbearbeitung bisher nur vereinzelt in der industriellen Fertigung eingesetzt werden. Komplexere Systeme dagegen, insbesondere ACC-Systeme für die Drehbearbeitung mit automatischer Schnittaufteilung, waren bisher trotz der auf der Hand liegenden Verbesserungsmöglichkeiten des Bearbeitungsprozesses nur im Laboratorium vorzufinden.

Durch den labormäßigen Aufbau konnten die Funktionsfähigkeit dieser Systeme nachgewiesen und erste Aussagen über die Vorteile getroffen werden. Allerdings war es im Laborbetrieb nicht möglich, alle in der Realität, d.h. in der industriellen Praxis auftretenden Bedingungen, wie z.B. die Vielfalt der Werkstückmaterialien und -formen, zu erfassen. Vor allem die Erschwernisse, die in der Praxis durch die Umgebungseinflüsse wie starker Schmutz, Kühlmittel und durch die Dauerbelastung auftreten, waren im Labor nicht nachzuvollziehen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine Pilotanlage im Werkzeugmaschinenlabor aufzubauen und anschließend in einen Produktionsbetrieb zu integrieren, um die Funktionsfähigkeit und den wirtschaftlichen Einsatz in der Industrie unter realen Produktionsbedingungen aufzuzeigen.

3. Anlagenkonfiguration und Funktionsablauf der AC-Bearbeitung

Die AC-Pilotanlage ist aus Komponenten aufgebaut, die sowohl aus der industriellen Serienproduktion stammen als auch im Rahmen des Vorhabens gefertigt wurden.

In Bild 2 ist die Anlagenkonfiguration der AC-Pilotanlage als Blockbild dargestellt. Sie läßt sich grob in die zwei Bereiche - Software und Hardware - einteilen. Der Softwareteil umfaßt im wesentlichen das CNC- und das ACC-Systemprogramm sowie die durch verschiedene Schnittstellen realisierte Kopplung zwischen den beiden Programnteilen. Zur Hardware zählen die Drehmaschine mit Schnittkraftsensor sowie die analoge Regeleinrichtung mit Maximalwertspeicher und A/D- bzw. D/A-Wandlern. Im Bild ist ferner der Signalfluß zwischen den einzelnen Komponenten dargestellt. Die Bedeutung der Signale wird im folgenden Abschnitt erläutert.

Für die Schnittleistung P_S bei der Drehbearbeitung gilt die Beziehung:

$$P_S = v \cdot F_S = 2\pi r \cdot n \cdot F_S = 2\pi \cdot n \cdot M_S$$

Da die Drehbearbeitung auf der Pilotanlage mit konstanter Schnittgeschwindigkeit v erfolgt, kann die Leistungsregelung durch eine Schnittkraftregelung realisiert werden. Für die Schnittkraft gilt:

$$F_S = s^{1-z} \cdot a \cdot k_{s1.1} \cdot \sin^{-z} \alpha$$

Die Größen spezifische Schnittkraft $k_{s1.1}$, Werkzeugeinstellwinkel α und Korrekturfaktor $1-z$ sind entweder materialabhängig oder bei der Zerspanung nicht beeinflussbar. Sie stellen im Schnittkraftregelkreis Störgrößen dar. Als Stellgrößen können daher nur der Vorschub s und die Schnitttiefe a verwendet werden. Eine gezielte, kontinuierliche Veränderung der Schnitttiefe während der Bearbeitung erfordert

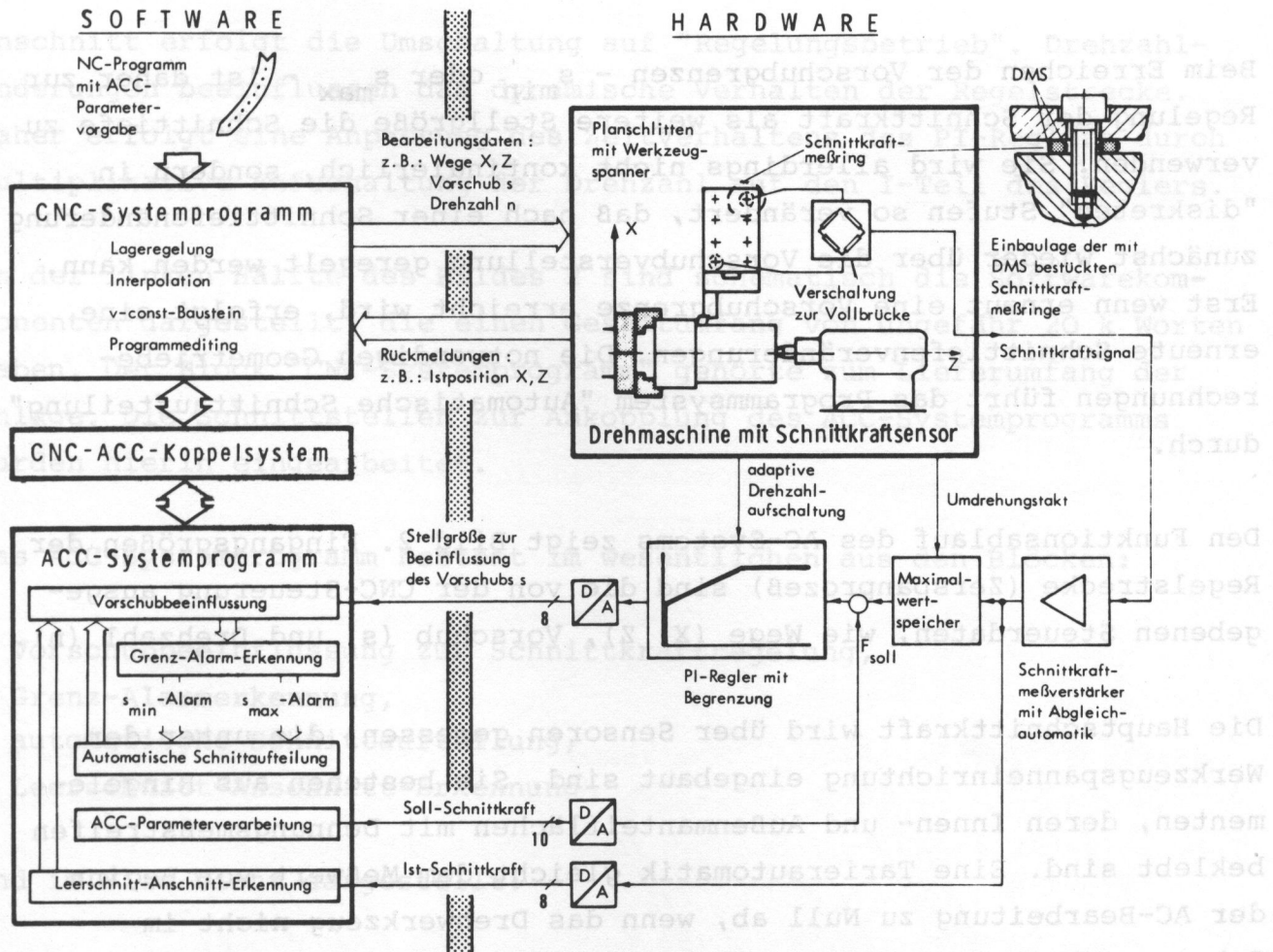


Bild 2: Blockschaltbild der Anlagenkonfiguration

ein Abweichen von den programmierten Werkzeugbewegungen und ist mit aufwendigen Geometrieberechnungen verbunden. Einfacher ist die Beeinflussung der Schnittkraft durch Variation des Vorschubs. Die Schnitttiefe geht dann als Störgröße ein, so daß sinngemäß der Zusammenhang gilt:

kleine Schnitttiefe - großer Vorschub,
große Schnitttiefe - kleiner Vorschub.

Die Regelung der Schnittkraft durch Verstellung des Vorschubs ist aus technologischen Gründen nur innerhalb gewisser Grenzen sinnvoll. Eine Verkleinerung des Vorschubs bei zunehmender Schnitttiefe hat zur Folge, daß aufgrund der ungünstiger werdenden Form des Spanungsquerschnitts keine gute Spanbildung mehr möglich ist. Ein zu großer Vorschub infolge einer sehr kleinen Schnitttiefe führt zu großen Belastungen der Werkzeugspitze und damit zur Gefahr des Schneidenbruchs.

Beim Erreichen der Vorschubgrenzen - $s_{\min}$ oder $s_{\max}$ - ist daher zur Regelung der Schnittkraft als weitere Stellgröße die Schnitttiefe zu verwenden. Sie wird allerdings nicht kontinuierlich, sondern in "diskreten" Stufen so verändert, daß nach einer Schnitttiefenänderung zunächst wieder über die Vorschubverstellung geregelt werden kann. Erst wenn erneut eine Vorschubgrenze erreicht wird, erfolgt eine erneute Schnitttiefenveränderungen. Die notwendigen Geometriebe-rechnungen führt das Programmsystem "Automatische Schnittaufteilung" durch.

Den Funktionsablauf des AC-Systems zeigt Bild 2. Eingangsgrößen der Regelstrecke (Zerspanprozeß) sind die von der CNC-Steuerung ausgegebenen Steuerdaten, wie Wege (X, Z), Vorschub (s) und Drehzahl (n).

Die Hauptschnittkraft wird über Sensoren gemessen, die unter der Werkzeugspanneinrichtung eingebaut sind. Sie bestehen aus Ringelementen, deren Innen- und Außenmantelflächen mit Dehnungsmeßstreifen beklebt sind. Eine Tarierautomatik gleicht dem Meßwert vor Beginn der AC-Bearbeitung zu Null ab, wenn das Drehwerkzeug nicht im Schnitt ist. Bei unrunder Teilen schwankt die Schnittkraft periodisch mit der Spindelumdrehung, was zu einem Schwingen der Stellgröße "Vorschub" und damit zu einem instabilen Bearbeitungsprozeß führt. Deshalb wird das Schnittkraftsignal zunächst in einen Maximalwert-Momentanwert-Speicher geführt, der mit dem Umdrehungstakt der Spindel getriggert ist. Diese Einrichtung leitet dem nachfolgenden Regler den maximalen Schnittkraftwert der vergangenen oder den der aktuellen Spindelumdrehung zu, wenn dieser größer ist.

Der so gewonnene Schnittkraft-Istwert wird mit dem Sollwert der Schnittkraft verglichen und die Differenz einem PI-Regler zugeführt. Das Ausgangssignal des Reglers dient als Stellgröße zur multiplikativen Beeinflussung des programmierten Vorschubs. Auf dem Anfahrweg vom Startpunkt zum Werkstück oder beim Überbrücken von Einschnitten hat die Schnittkraft den Wert Null. Durch eine Spezialschaltung wird erreicht, daß das Reglerausgangssignal dann nicht auf den oberen Begrenzungswert hochläuft, sondern einen unteren Grenzwert beibehält. Während des Leerweges wird mit einem erhöhten Vorschub gefahren, der in der Steuerungssoftware erzeugt wird. Beim

Anschnitt erfolgt die Umschaltung auf "Regelungsbetrieb". Drehzahländerungen beeinflussen das dynamische Verhalten der Regelstrecke. Daher erfolgt eine Anpassung des Zeitverhaltens des PI-Reglers durch multiplikative Aufschaltung der Drehzahl auf den I-Teil des Reglers.

In der linken Hälfte des Bildes 2 sind schematisch die Softwarekomponenten dargestellt, die einen Gesamtumfang von ungefähr 20 k Worten haben. Der Block "CNC-Systemprogramm" gehörte zum Lieferumfang der Anlage. Die Schnittstellen zur Ankopplung des ACC-Systemprogramms wurden hierin eingearbeitet.

Das ACC-Systemprogramm besteht im wesentlichen aus den Blöcken:

- Vorschubbeeinflussung zur Schnittkraftregelung,
- Grenz-Alarmerkennung,
- automatische Schnittaufteilung,
- Leerschnitt-Anschnitt-Erkennung

und im Bild nicht dargestellt:

- Fehlerüberwachung zum Schutz der Anlage.

Der Block Leerschnitt-Anschnitt-Erkennung steuert die Umschaltung auf erhöhten Leervorschub, wenn sich das Werkzeug nicht im Schnitt befindet. Die Fehlerüberwachung bezieht sich hauptsächlich auf den Schnittkraftsensor und den Hardwareteil der Regelung. Bei einem Defekt wird die AC-Bearbeitung sofort unterbrochen bzw. ein Start verhindert.

4. Schnittkraftsensor

In der Schnittkraftgleichung, die der Schnittkraftregelungseinrichtung zugrunde liegt, ist die tangential am Werkstück, d.h. senkrecht auf den Planschlitten wirkende Kraftkomponente enthalten. Die Schnittkraftmeßeinrichtung mußte daher speziell zur Erfassung dieser Kraftkomponente ausgelegt werden. Bei der verwendeten Drehmaschine bot sich der Bereich zwischen Werkzeugspanner und Planschlitten als Einbauort für die Kraftsensoren an. Sie bestehen aus Ringelementen aus vergütetem Federstahl, die ähnlich wie Unterlegscheiben unter dem

Spanner eingebaut und mit den Befestigungsschrauben vorgespannt wurden (Bild 3). Damit das Meßergebnis unabhängig von der Einspannlänge des verwendeten Werkzeugs war, mußte gewährleistet sein, daß der gesamte Kraftfluß nur über die Meßringe verlief und ein Kraftneben-schluß vermieden wurde.

Durch die Anordnung der DMS auf den Mantelflächen wird erreicht, daß nur die Kraftkomponenten gemessen werden, die axial auf die Ringe wirken. Über zwei nicht im Kraftfluß liegende DMS erfolgt eine Temperaturkompensation.

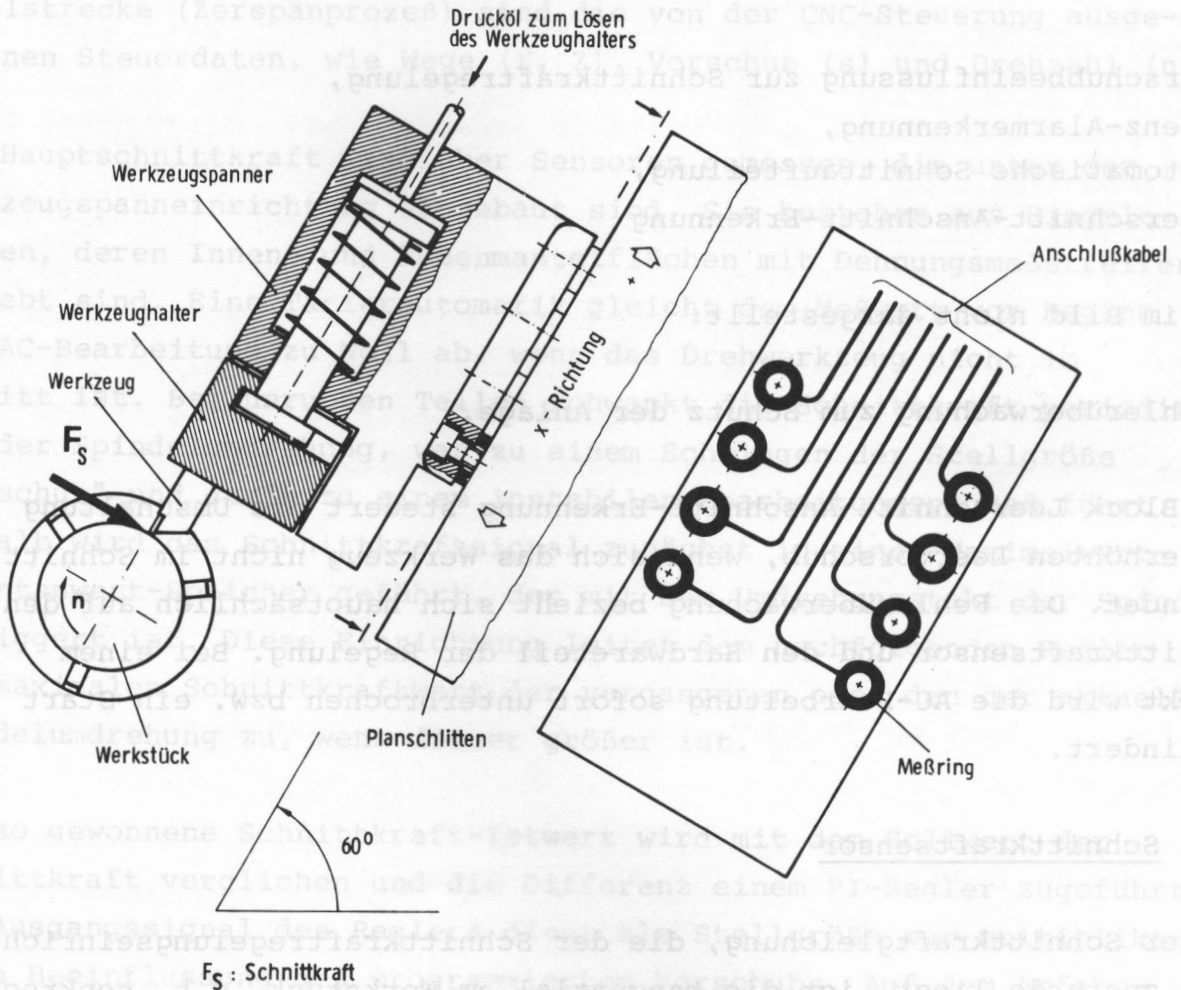


Bild 3: Anordnung des Schnittkraftsensors unter dem Werkzeugwechsler der Drehmaschine

5. Automatische Schnittaufteilung

Als Schnittaufteilung bezeichnet man die Zerlegung eines Werkstückaufmaßes in zerspanbare Einzelschnitte. Bei der Drehbearbeitung kann zwischen verschiedenen Methoden und Ausbaustufen unterschieden werden:

- manuelle Schnittaufteilung durch den NC-Programmierer,
- Schnittaufteilung durch ein NC-Programmiersystem,
- vorprogrammierte Schnittaufteilung durch Unterprogrammtechnik oder Zyklenverarbeitung in der CNC-Steuerung,
- automatische, prozeßabhängige Schnittaufteilung durch den Rechner der CNC-Steuerung.

Bei der Pilotanlage wird ein automatisches Schnittaufteilungssystem eingesetzt, das on-line zum Prozeßgeschehen arbeitet. Dadurch ergeben sich gegenüber den bisherigen System gravierende Vorteile wie:

- Verkürzung und Vereinfachung der NC-Programmierung,
- Einsparungen bei der Bearbeitungszeit,
- Unabhängigkeit von schwankenden Rohteilabmessungen.

Der Ablauf der achsparallelen Schnittaufteilung sei an einem einfachen Werkstückbeispiel im Bild 4 erläutert. Als Bearbeitungsinformationen brauchen im NC-Programm nur die Fertigteilkontur - im Bild die Sätze N=1 bis N=3 - und die Normalschnitttiefe a_0 sowie die Sollwerte für die Grenzregelung vorgegeben zu werden.

In der ersten Phase der Werkstückbearbeitung wird das unbekannte Roh-
teil erfaßt. Vom Anfangspunkt der AC-Satzfolge aus bewegt sich das Werkzeug auf das Werkstück zu. Nach dem Anschnitt steigt die Schnittkraft sehr schnell an, und der Vorschub wird entsprechend schnell vom Schnittkraftregler reduziert. Beim Erreichen einer unteren Vorschubgrenze $s_{\min}$, dies entspricht einer bestimmten Schnitttiefe, wird die Längsbewegung gestoppt und die Schnitttiefe reduziert, indem das Werkzeug um den Weg a_0 zurückgezogen wird. Der Steuerungsrechner speichert die Koordinaten des Unterbrechungspunktes BA(o) ab und be-

rechnet den nächsten Längsschnitt ($M=1$) bis zum Bearbeitungsendpunkt BE (1). Im Verlauf dieses und des nächsten Längsschnittes wird die Schnitttiefe nochmals reduziert. Beim dritten Schnitt nimmt der Vorschub aufgrund der kleiner werdenden Schnitttiefe zu, so daß beim Erreichen seiner oberen Grenze ein $s_{\max}$ -Alarm ausgelöst wird. Die Bewegung wird abgebrochen und der Meißel fährt zum letzten Unterbrechungspunkt BA (2) zurück. Von dort aus wird das stufenförmige Aufmaß in einzelnen Längsschnitten zerspant.

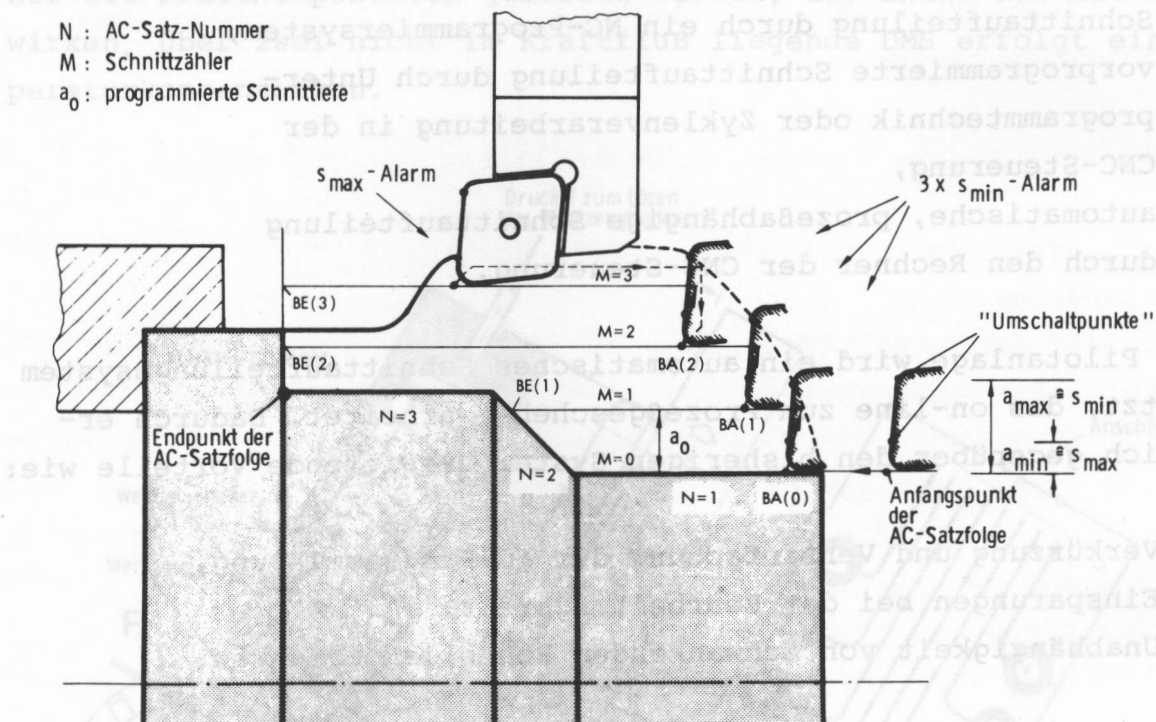


Bild 4: Prinzip der achsparallelen automatischen Schnittaufteilung

Abhängig von der Werkstückform sind verschiedene (16) Schnittaufteilungsarten anzuwählen, die sich in ihrem Bearbeitungsmodus unterscheiden.

Die Bearbeitung kann erfolgen:

achsparallel	oder	konturparallel
außen	oder	innen
längs	oder	plan
rechts	oder	links.

6. Bearbeitungsbeispiel "Anschlußwelle"

Das vorgeschmiedete Rohteil (Bild 6) aus 30 Mn5 V hatte die Abmessungen $\varnothing 260 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$. Die Einspannseite war bereits vorbearbeitet. Im Bild 5 ist das Fertigteil und der Ablauf der AC-Bearbeitung dargestellt. Das Aufmaß wurde in drei Abschnitten mit verschiedenen Werkzeugen zerspant.

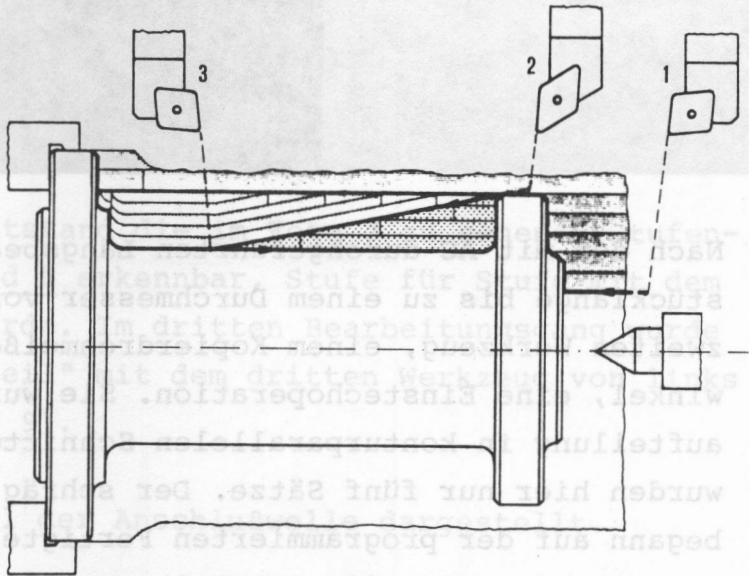


Bild 5:

Bearbeitungsablauf

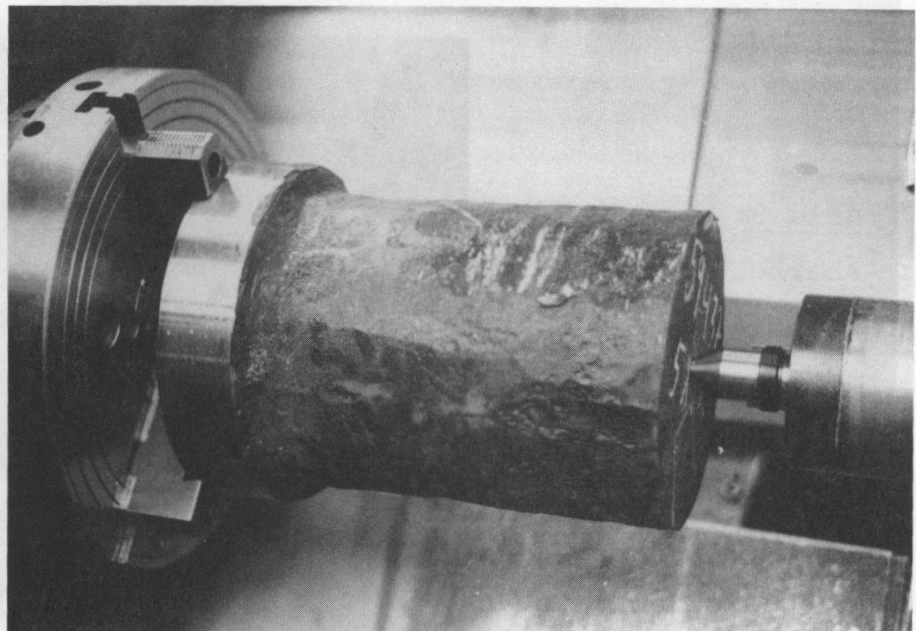
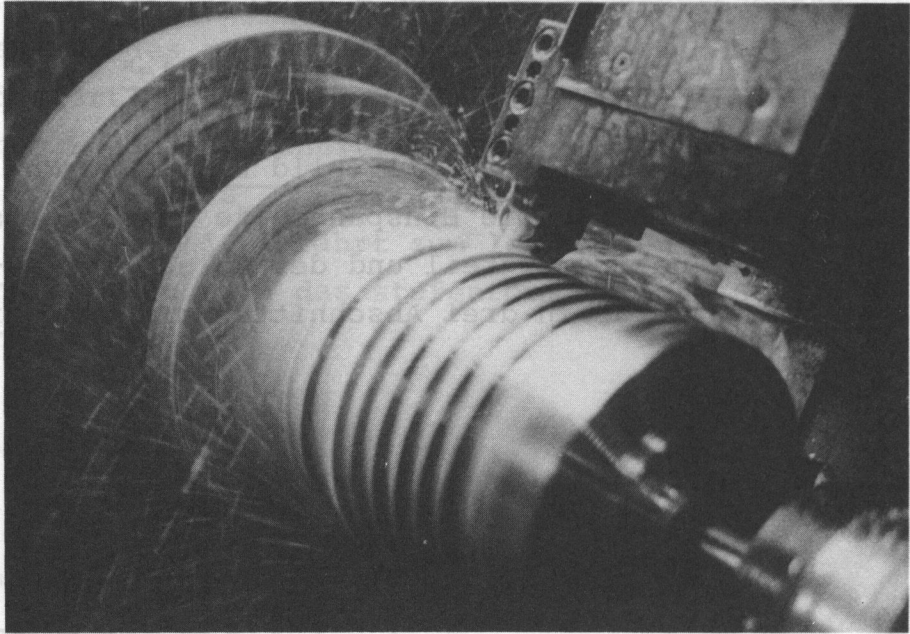


Bild 6: Rohteil

Bild 7:
Einteilung in
konturparallele
Schnitte



Nach der mit AC durchgeführten Längsbearbeitung über die ganze Werkstücklänge bis zu einem Durchmesser von 210 mm, erfolgte mit dem zweiten Werkzeug, einem Kopierdrehmeißel mit großem Nebenschneidwinkel, eine Einstechoperation. Sie wurde mit automatischer Schnittaufteilung in konturparallelen Schnitten durchgeführt. Programmiert wurden hier nur fünf Sätze. Der schräg verlaufende Einstechvorgang begann auf der programmierten Fertigteilkontur. Wegen der zunehmenden Schnitttiefe wurde die Bearbeitung schon nach kurzem Schnitt aufgrund eines $s_{\min}$ -Alarms unterbrochen und nach der Schnitttiefenreduzierung parallel zur Fertigteilkontur weiter zerspant. Dieser Vorgang wieder-

Bild 8:
Abarbeiten des
Aufmaßes

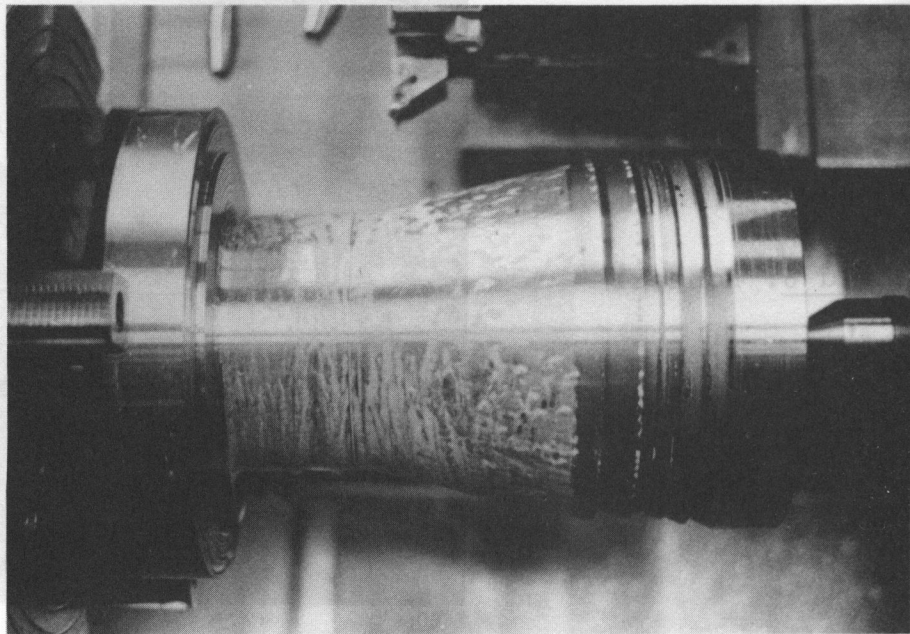
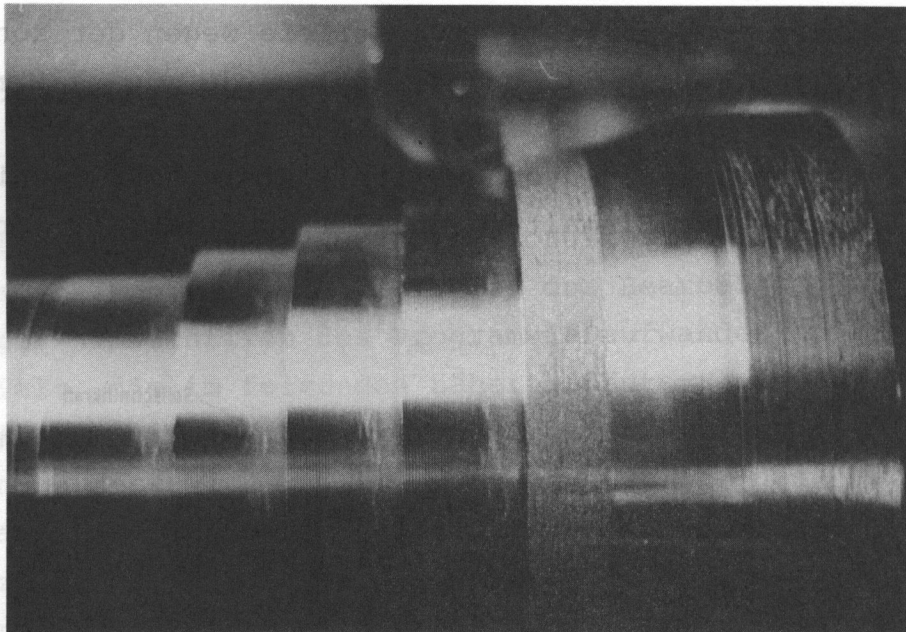


Bild 9:

Bearbeitung mit
"Rechtsmeißel"

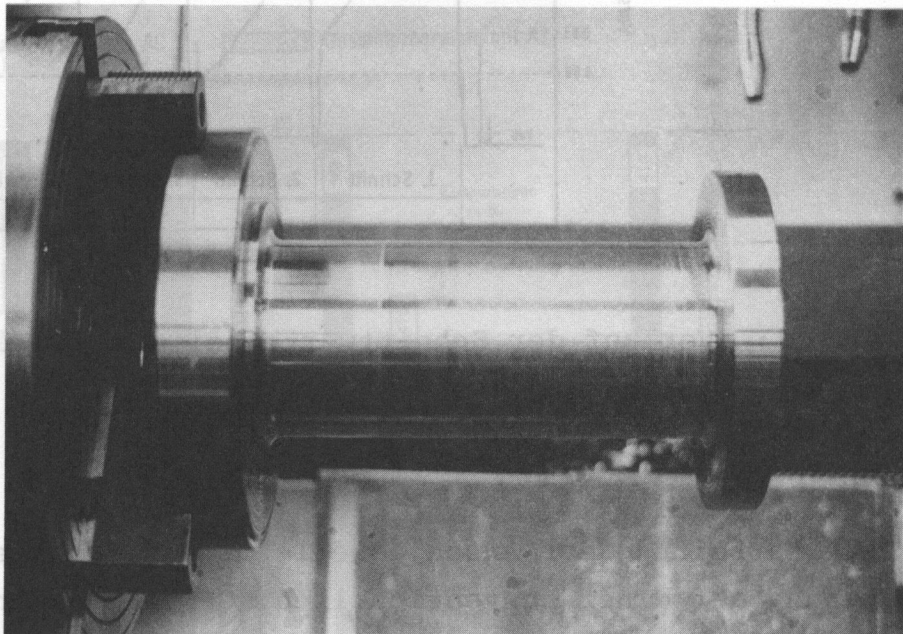


holte sich einige Male. Es entstand die im Foto 7 zu sehende Stufenkontur, die dann, wie im Bild 8 erkennbar, Stufe für Stufe mit dem zweiten Werkzeug zerspant wurde. Im dritten Bearbeitungsgang wurde das jetzt kegelförmige "Rohteil" mit dem dritten Werkzeug von links nach rechts bearbeitet (Bild 9).

Im Bild 10 ist das Fertigteil der Anschlußwelle dargestellt.

Bild 10:

Fertigteil



Auf der Oberfläche der von der Schnittaufteilung erzeugten Stufenkontur (Bild 9) sind anhand der veränderlichen Vorschubriefen deutlich die Einflüsse der Schnittkraftregelung zu erkennen. Der zu diesem Zerspanzyklus gehörende Schnittkraft- und Vorschubfaktorverlauf ist im Bild 11 verdeutlicht.

Da beim 1. Schnitt die Schnitttiefe wegen der konischen Rohteilform vom Wert Null aus anstieg, wurde zunächst mit maximalem Vorschub (VoG) zerspant, wobei die Schnittkraft bis zu ihrem Sollwert zunahm. Wegen der weiter ansteigenden Schnitttiefe wurde der Vorschub zur Einhaltung der Sollschnittkraft heruntergeregelt.

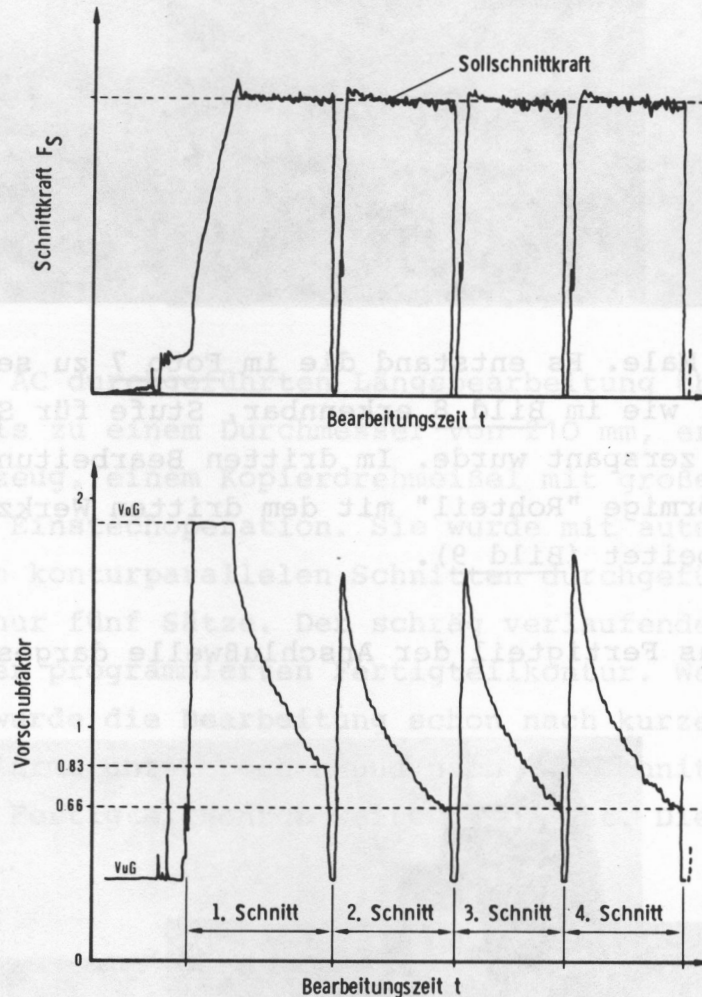


Bild 11: Verlauf der Schnittwerte bei der in Bild 9 dargestellten Zerspantung

Die Bearbeitung der "Anschlußwelle" mit AC dauerte 43 min, die Zerspantung auf einer konventionellen NC-Drehmaschine nahm 56 min in Anspruch. Das entspricht einem Zeitgewinn von 24 %.

Der Programmieraufwand konnte durch den Einsatz der automatischen Schnittaufteilung um 71 % gesenkt werden.

7. Ergebnisse des praktischen Einsatzes

Zur Untersuchung der Wirtschaftlichkeit des AC-Systems wurde ein repräsentatives Teilespektrum sowohl in konventioneller NC-Bearbeitung als auch mit Einsatz von ACC gefertigt. Bei der Bearbeitung mit ACC wurden Einsparungen hinsichtlich des Programmieraufwandes und der Bearbeitungszeit erzielt, die im folgenden näher erläutert werden sollen. Im Bild 12 ist der Programmieraufwand von vier typischen Werkstückserien gegenübergestellt. Es wird die Länge sowohl des Gesamtprogramms als auch des Schruppanteils verglichen, wobei die Gesamtprogrammlänge zu 100 % gesetzt wurde. Im rechten Teil der beiden Bilder ist der Durchschnittswert der Einsparungen bei allen bearbeiteten Werkstücken dargestellt. Die Zahlen in den Säulen entsprechen der absoluten Anzahl der NC-Funktionen.

Es ist zu erkennen, daß der Programmieraufwand durch den Einsatz des AC-Systems mit der automatischen Schnittaufteilung um bis zu 75 % gesenkt werden konnte.

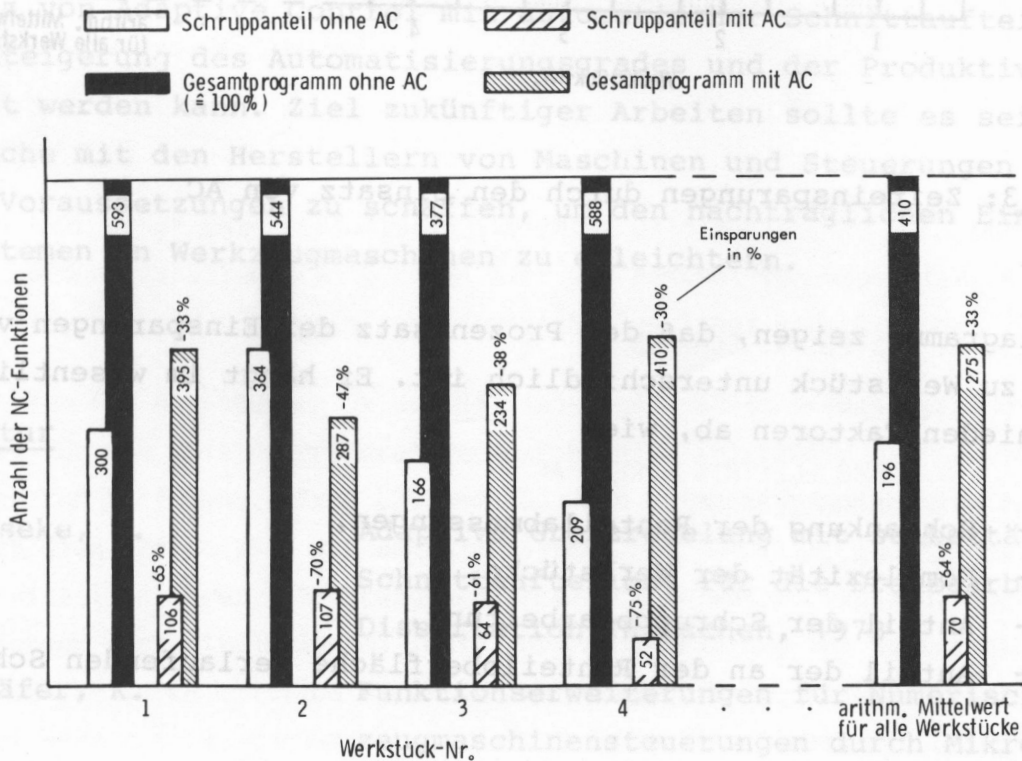


Bild 12: Vergleich des Programmieraufwandes zwischen NC- und AC-Bearbeitung anhand der Anzahl der NC-Funktionen

Im Bild 13 sind die Bearbeitungszeiten der vier Werkstücke ohne und mit AC-Betrieb gegenübergestellt. Die Säulengruppen geben jeweils den Mittelwert der Schruppzeit ohne und mit AC-Einsatz einer Werkstückserie wieder. Im rechten Bildteil ist der Durchschnittswert aller durchgeführten Werkstückbearbeitungen dargestellt.

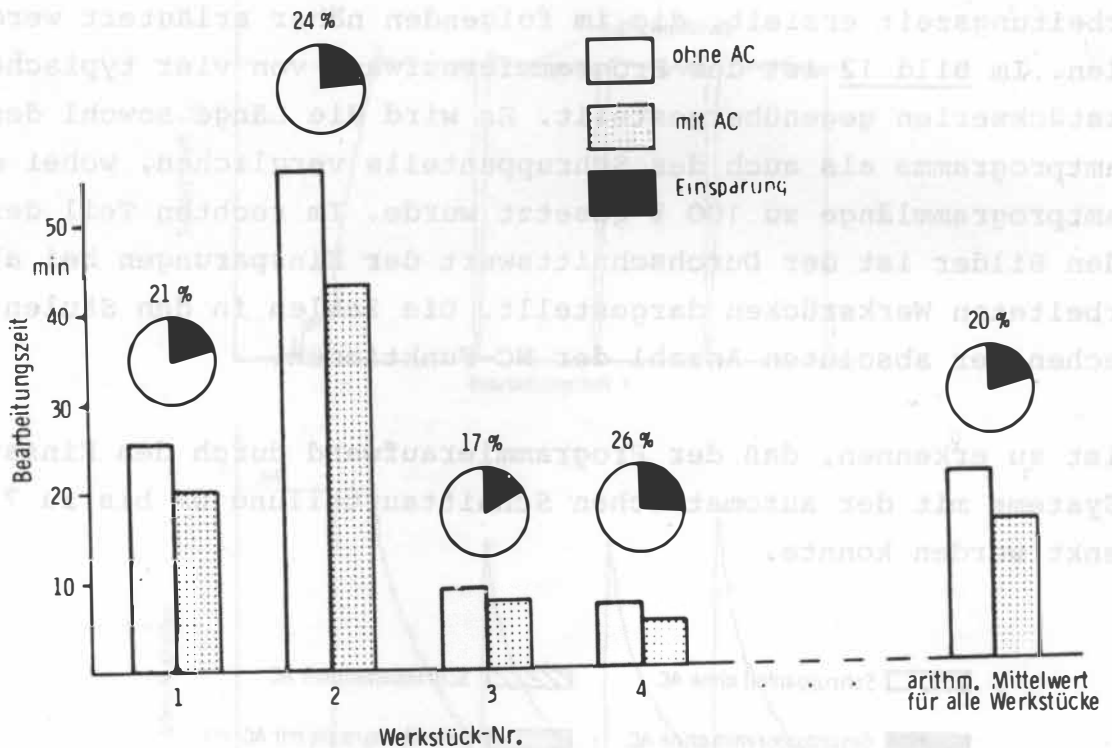


Bild 13: Zeiteinsparungen durch den Einsatz von AC

Die Diagramme zeigen, daß der Prozentsatz der Einsparungen von Werkstück zu Werkstück unterschiedlich ist. Er hängt im wesentlichen von verschiedenen Faktoren ab, wie:

- Schwankung der Rohteilabmessungen,
- Komplexität der Werkstücke,
- Anteil der Schruppbearbeitung,
- Anteil der an der Rohteiloberfläche verlaufenden Schnitte.

Der Aufbau der Pilotanlage zeigte auch, daß die Erweiterung von sehr komplexen Industrieanlagen durch zusätzliche Automatisierungssysteme Eingriffe in das interne Anlagenkonzept erforderten, die ohne Hilfe des Herstellers vom Anwender allein nicht durchführbar waren. Insbesondere die Implementierung der AC-Systemsoftware in das vorhandene CNC-Steuerungsprogramm setzte eine umfangreiche Einarbeitung in Detailfunktionen der CNC-Steuerung voraus. Für den Schnittkraftsensor mußte eine an die Drehmaschine angepaßte Lösung entworfen werden. Der Einbau unter dem Werkzeugspanner machte Konstruktionsänderungen erforderlich, die der Maschinenhersteller durchführte.

Für den Maschinenbediener brachte die Einführung der Bearbeitung mit Adaptive Control Anforderungen mit sich, die im Laborbetrieb nicht erkennbar waren. Im Gegensatz zur normalen NC-Bearbeitung, wo alle Bearbeitungsschritte im voraus bekannt sind, treten im AC-Betrieb Prozeßzustände auf, die vom Bediener nicht vorhersehbar und nur schwer zu beurteilen sind. Es kann dann zu Situationen kommen, wo Zweifel bestehen, ob ein Eingriff in die Bearbeitung erfolgen soll oder nicht.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigen auf, daß durch den Einsatz von Adaptive Control mit automatischer Schnittaufteilung eine Steigerung des Automatisierungsgrades und der Produktivität erzielt werden kann. Ziel zukünftiger Arbeiten sollte es sein, in Absprache mit den Herstellern von Maschinen und Steuerungen einheitliche Voraussetzungen zu schaffen, um den nachträglichen Einbau von AC-Systemen in Werkzeugmaschinen zu erleichtern.

Literatur

1. Gieseke, E. Adaptive Grenzregelung mit selbsttätiger Schnittaufteilung für die Drehbearbeitung
Dissertation TH Aachen, 1973
2. Schäfer, K. Funktionserweiterungen für Numerische Werkzeugmaschinensteuerungen durch Mikroprozessor-einsatz
Dissertation TH Aachen, 1977.